

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут (факультет) електроніки
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

“ ____ ” _____ 20 ____ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва)

на тему: Конструктивно-технологічні методи підвищення електропровідності міжконтактних з'єднань інтегральних схем

Виконав: студент 6-го курсу, групи ДП-92мп
(шифр групи)

Охрімчук Олександр Борисович
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

Науковий керівник доктор технічних наук, професор Вербицький Володимир Григорович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

Георгій СВЄЧНИКОВ

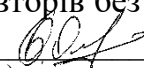
(підпис)

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Діденко Ю.В.

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань. Студент 

(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) електроніки
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

групи ДП-92мп Охрімчуку Олександрю Борисовичу

(група, прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Конструктивно-технологічні методи підвищення електропровідності міжконтактних з'єднань інтегральних схем,
керівник проекту Вербицький Володимир Григорович, доктор технічних наук, професор.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту Низькоомні конструктивні елементи мікроконтактного з'єднання – багатошарова контактна площинка з нижнім високопровідним срібним шаром і низькоомне припійне контактне з'єднання.

4. Зміст пояснювальної записки (конкретні завдання на дипломний проект) 1.Розробити конструктивно-технологічні методи підвищення електропровідності МКЗ, що забезпечують зменшення опору зварного накладного мікроконтактного з'єднання мікродроту та плівкового провідника. 2. Визначити в скільки разів змінюється опір мікроконтактного з'єднання при використанні припійного способу в порівнянні зі зварним способом. 3.Дослідити вплив перехідної мікродротяної ланки між внутрішнім і зовнішнім виводом для металоскляного корпусу ІС.
4.Розробити методіку вимірювання МКЗ.
5.Розробити технологію, яка забезпечує опір з'єднання менше 20 МОм.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____.

6. Консультанти розділів проекту*


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01.09.2020 _____.

Календарний план виконання

№	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	<i>Літературний огляд.</i>	<i>01.09.20-15.09.20</i>	
2.	<i>Розробка конструктивно-технологічного методу підвищення МКЗ.</i>	<i>16.09.20-24.09.20</i>	
3.	<i>Дослідження припійного і зварного способів з'єднання.</i>	<i>25.09.20-01.10.20</i>	
4.	<i>Дослідження впливу перехідної мікродротяної ланки між внутрішнім і зовнішнім виводом для металоскляного корпусу ІС.</i>	<i>02.10.20-15.10.20</i>	
5.	<i>Розробка методики вимірювання МКЗ.</i>	<i>16.10.20-20.10.20</i>	
6.	<i>Розроблення технології, яка забезпечує опір з'єднання менше 20 мОм</i>	<i>21.10.20-25.10.20</i>	
7.	<i>Оформлення дипломної роботи.</i>	<i>26.10.20-30.11.20</i>	

Студент


(підпис)

О.Б. Охрімчук
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

Вербицький В.Г.

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

АНОТАЦІЯ

Роботу викладено на 82 сторінках, вона містить 5 розділів, 20 ілюстрацій, 28 таблиць та 17 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є мікроконтактні з'єднання інтегральних мікросхем.

Предмет дослідження – електричний опір мікроконтактних з'єднань інтегральних схем.

Метою даної роботи є виявлення і дослідження аналітичних залежностей електричного опору МКЗ від їхніх конструктивних параметрів і технологічних способів виготовлення та розробка методів підвищення електропровідності МКЗ.

В першому розділі ми проаналізували теперішній стан конструктивно-технологічних методів виготовлення та підвищення електропровідності мікроконтактних з'єднань.

В другому розділі систематизували існуючі способи контролю опору мікроконтактних з'єднань.

В третьому розділі займалися розробкою моделей опору гнучких дротяних та жорстких стовпчикових монтажних з'єднань інтегральних схем.

В четвертому розділі було розкрито основну думку даної роботи, а саме конструктивно-технологічні методи підвищення електропровідності мікроконтактних з'єднань інтегральних схем.

В п'ятому розділі ми працювали над розробкою стартап-проекту задля подальшого просування і монетизації методів наших досліджень.

ABSTRACT

The work is presented on 82 pages, it contains 5 sections, 20 illustrations, 28 tables and 17 sources in the list of references.

The object of research is microcontact connections of integrated circuits.

The subject of research is the electrical resistance of microcontact connections of integrated circuits.

The purpose of this work is to identify and study the analytical dependences of the electrical resistance of microcontact connections on their design parameters and technological methods of manufacture and development of methods to increase the electrical conductivity of microcontact connections.

In the first section, we analyzed the current state of structural and technological methods of manufacturing and improving the electrical conductivity of microcontact connections.

The second section systematizes the existing methods of controlling the resistance of microcontact connections.

In the third section, we developed models of resistance of flexible wire and rigid column mounting connections of integrated circuits.

The fourth section reveals the main idea of this work, namely the design and technological methods of increasing the electrical conductivity of microcontact connections of integrated circuits.

In the fifth section, we worked on developing a startup project to further advance and monetize our research methods.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГІС – гібридна інтегральна схема

ЖМКЗ – жорстке мікроконтактне з'єднання

ІС – інтегральна схема

МЕП – мікроелектронний пристрій

МКЗ – мікроконтактне з'єднання

МСЛ – мікросмужкова лінія

CSP – Chip Scale Package

MCM – multichip module

PoP – package on package

SIP/SOP – system-in/n-package

WLP – wafer-level-packaging

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	9
1. ТЕПЕРІШНІЙ СТАН КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ МІКРОКОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ..	11
1.1. Тенденції розвитку мікромонтажу інтегральних схем	11
1.2. Сучасні технології упакування і мікромонтажу кристалів інтегральних схем	14
2. СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ КОНТРОЛЮ МІКРОКОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ.....	18
2.1. Контроль якості електричного з'єднання кристалу інтегральної схеми із контактними площинками плати	18
2.2. Систематизація способів вимірювання електричного опору мікроконтактних з'єднань.....	19
2.2.1. Метод вимірювального моста	19
2.2.2. Метод вимірювання струму і напруги	20
2.3. Аналіз вищевикладеного матеріалу	22
3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ОПОРУ ГНУЧКИХ ДРОТЯНИХ ТА ЖОРСТКИХ СТОВПЧИКОВИХ МОНТАЖНИХ З'ЄДНАНЬ ІС.....	23
3.1. Розробка моделі електричного опору дротяного накладного МКЗ	23
3.2. Моделювання впливу способу з'єднання стовпчикових виводів інтегральних схем на їх опір	27
3.3. Висновки до розглянутого розділу	37

4. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ МІКРОКОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ ІС	38
4.1. Розробка та дослідження комбінованого способу виготовлення низькоомних контактних площинок мікроплати гібридної ІС.....	38
4.2. Розробка та дослідження низькоомного способу з'єднання виводів з конактними площинками мікроплати	44
4.3. Конструктивні методи зменшення опору дротяного МКЗ на основі дослідження впливу на опір геометричних розмірів конструктивних елементів і провідності умовного перехідного шару	46
4.4. Визначення напрямків зменшення опору жорстких стовпчикових мікроконтактних з'єднань ІС на основі дослідження різних конструктивно-технологічних варіантів з'єднання.....	51
4.5. Висновки по проробленій роботі	64
5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	66
5.1. Опис ідеї проекту	66
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	68
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	68
5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	74
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	76
ВИСНОВКИ	80
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	82

ВСТУП

Елементи та пристрої мікро- та наноелектроніки визначають рівень радіо- і електронного приладобудування, вимірювальної техніки, обчислювальної техніки, складних систем управління та регулювання, військової та побутової техніки, техніки зв'язку тощо. Основу їх складає елементна база, а найбільшого розвитку та вдосконалення набули саме інтегральні (ІС). Однією з проблем в них є створення надійного електричного зв'язку як в самій мікросхемі так і в зовнішній комутації. Такий зв'язок між різноманітними компонентами інтегральної схеми забезпечується через виводи за допомогою мікроконтактних з'єднань (МКЗ). І сучасних ІС спостерігається значне зростання кількості внутрішніх і зовнішніх виводів, що спричинює їхній суттєвий вплив на характеристики пристроїв. Тому роль МКЗ в забезпеченні працездатності та надійності ІС постійно зростає. Збільшення кількості виводів йде паралельно збільшенню степені інтеграції, що характерно для сучасних ІС. Значною є зміна кількості виводів корпусу в апаратурі широкого застосування. Значне збільшення числа МКЗ приводить до зростання їх загального електричного опору, що, в свою чергу, викликає затримку сигналів і збільшує втрати електричної енергії. Це все спричинює його суттєвий вплив на характеристики пристроїв, у зв'язку з чим електричний опір МКЗ необхідно зменшувати. Параметри МКЗ визначають конструктивно-технологічні фактори. Щоб виявити шляхи зменшення опору, необхідно здійснити структурний аналіз його конструктивних складових і провести їх кількісну оцінку. Потребує подальшого удосконалення технологія виготовлення МКЗ, і в тому числі, технологія контролю електричного опору, та виявлення її впливу на опір. Не дивлячись на значну кількість наукових робіт, присвячених цій проблемі, потребує дослідження зв'язок опору з конструктивними параметрами МКЗ (довжиною, шириною і висотою контактної площинки і деформованої частини мікродроту, провідністю перехідної області). Отже, дослідження і аналіз впливу конструктивно-технологічних параметрів на електричний опір МКЗ і визначення

кількісного вкладу конструктивних елементів в сумарний опір мікроконтактного вузла інтегральної схеми та удосконалення його контролю є актуальною задачею.

Ефективним методом аналізу та дослідження характеристик МКЗ з метою оптимізації процесів виготовлення їх елементів є моделювання. Значне зростання кількості МКЗ і їхнього впливу на характеристики сучасних ІС викликало потребу в розробці моделей опору МКЗ та їх дослідження з конструктивно-технологічного боку для покращення параметрів з'єднань, і насамперед, покращення електропровідності. Отже, визначення шляхів покращення електропровідності і, відповідно, зменшення електричного опору, як основного параметру МКЗ, на підставі конструктивно-технологічного аналізу розроблених моделей та удосконалення технологічного процесу їх виготовлення є актуальними і потребує наукового дослідження.

1. ТЕПЕРІШНІЙ СТАН КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ МІКРОКОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ

1.1. Тенденції розвитку мікромонтажу інтегральний схем

Мікроконтактні з'єднання через виводи забезпечують зв'язок між різноманітними компонентами інтегральної схеми. Конструкція кількості виводів ІС безпосередньо пов'язані з конструкцією корпусу. Призначення ж корпусу найперше полягає в тому, щоб витративши невеликі засоби, забезпечити зберігання мікросхеми в процесі експлуатації, а також необхідне функціонування при її роботі у складі пристрою. Вартість корпусу за період з 1970 по 1990 рік складала приблизно 1 цент за вивід. Так, корпус, що має 200 виводів, обходився в 2 долари, що вважалось недопустимим. Однак зі збільшенням числа транзисторів на кристал вимагалось все більше виводів, що тягнуло за собою багатократне збільшення вартості корпусу.

Значне зростання загальної кількості зовнішніх (в корпусі) і внутрішніх (на кристалі і підкладці) виводів ІС призводить до того, що проблеми вивідного монтажу виходять на чільні позиції у виробництві мікроелектронних виробів. Для того щоб не допустити значного його подорожчання, необхідно було знайти нове, нестандартне рішення. Тому промисловість вдалася до шляху інтеграції двох технологічних процесів: виготовлення корпусів і виготовлення кристалів по технології WLP (wafer-level-packaging) починаючи з найранішньої стадії обробки кремнієвої пластини. Такі компанії як IBM використовують цю технологію вже протягом багатьох років, створюючи на кремнієвій пластині стовпчикові виводи припою. На сьогодні й інші виробники мікросхем вимушені піти по цьому шляху, щоб забезпечити можливість тестування кристалів мікросхем до різки пластин, гарантуючи тим самим їх високу якість.

В технології WLP останнім часом пройшли дві важливі зміни: перехід до безсвинцевих припоїв і зменшення і зменшення кроку між виводами мікросхем до

величини менше 100 мкм. Це дозволило збільшити кількість виводів на кристалі. Поряд з цим багато японських і американських компаній активно розроблюють різні модифікації технології WLP. Наприклад, група професора Мейндла (Meindl) із Технічного інституту Джорджії розробила так звану технологію SoL (sea-of-leads), яка дозволяє досягнути густини виводів на поверхні кристалу біля 10000 виводів/см². Нові технології можуть із успіхом використовуватися спільно із технологіями SOC (system-on-chip) і SIP/SOP (system-in/on-package).

Напівпровідникова промисловість досягла вагомих успіхів і стрімко наближується до історичного моменту – фізичної межі можливого зменшення розмірів елементів. Якщо ще декілька років тому в компанії Intel велося виробництво чіпів по технології 65 нм, то на 2007-й рік планувався перехід на 45-нм процес, на 2009-й – впровадження 32-нанометрового, а в 2011 технологічного процесу 22 нм. Розвиток мікроелектроніки до останнього часу підпорядковувалися законам Мура, хоча останнім часом відбувається не відповідність його прогнозам, так як досягнути все кращого технологічного процесу стає все складніше і складніше. Фізичні принципи побудови нових активних і пасивних мікрорадіоелементів і самих МЕП повинні будуть змінитися, але основні способи технологічних методів виготовлення та контролю мікроконтактних з'єднань МЕП на нових фізичних принципах, більш за все, буде перейнята від теперішніх пристроїв, тому що під'єднуватися потрібно буде і до нових пристроїв.

До фізичної межі можливого зменшення розмірів наблизилися і монтажні провідники. І гранична межа обмежується зовсім не технологічною спроможністю їх виготовлення, а механічною міцністю. Річ в тім, що для діаметру дроту 8 мкм (золото), допустиме зусилля, що може до нього прикладатися дорівнює $P = \sigma_{\text{гр}} * \pi * \frac{D^2}{4} = (5...7) \text{ г}$, а це означає, \ що виникають проблеми при розмотування і намотуванні мікродроту на котушку, де зусилля натягування дорівнює приблизно цій величині. Тобто дріт починає рватися при звичайному намотуванні його на

котушку і розмотуванні, а такі операції передбачені технологічними процесами як виготовлення, так і використання мікродроту.

Основним критерієм подальшої мініатюризації, тобто зменшення розмірів мікросхеми є обґрунтоване сподівання на підвищення обсягів її продажу та збільшення застосування, особливо у таких областях як космонавтика, військова промисловість, медицина і телекомунікації. Проте, оптимальний вибір розмірів виробу представляє собою компроміс між можливостями технології і витратами на її виготовлення.

Якщо успіх виробу на ринку залежить від степені його мініатюризації, здатності роботи на більш високих частотах і зменшення розсіюваної потужності, то більшість технологічних проблем при його виготовленні нині так чи інакше пов'язано з монтажем кристалу на підкладку. Для прикладу, із зменшенням розміру кристалу мікросхем все більше важливою стає оптимальне трасування провідників. Невдале трасування може призвести до збільшення паразитних ємності, індуктивності і опору між елементами. Надто густе розміщення доріжок може привести до збільшення відмов із-за короткого замикання між ними. Це в комплексі вимагає оптимізації конструктивно-технологічного рішення контактної провідникової системи ІС. Для здійснення такої оптимізації необхідне розроблення математичних моделей параметрів складових частин цієї системи, зокрема математичних моделей їхнього електричного опору.

Наближення розмірів до граничної межі зменшення мікроелектронних елементів змушує розробників ІС та МЕР вже зараз шукати нові підходи в їх реалізації. Одним із них – організації передачі сигналу на рівні елементарних частинок, за допомогою спінових хвиль. Є теоретична ідея багатократного використання електронів. Ще одна альтернатива – вуглеродні і кремнієві нанотрубки. Наступна альтернатива – виготовляти чіпи великих розмірів збільшуючи їх площу, або будувати тривимірні багаточарові мікросхеми. Такі рішення пропонує сам Гордон Мур, а також професор Стенфордського

університету Том Лі та деякі інші дослідники. Цей шлях на сьогодні найбільш практично реалізується і ним пішли провідні фірми світу, вважаючи, що найбільша густина розміщення кристалів досягає в мікросхемах з простором розташуванням кристалів (так званих 3-D-мікросхемах). Вперше вони були використані у 1999 році в мобільних телефонах. В них мікросхеми флеш-пам'яті і SPAM були розташовані одна над іншою, що дозволило збільшити ємність пам'яті без збільшення зайнятої площі. Якщо при монтажі безкорпусної мікросхеми коефіцієнт використання площі підкладки складає 100 %, то при просторовому розташуванні декількох кристалів він може бути в декілька разів більшим. Окрім цього, сучасні технології отримання кристалів мінімальної товщини дозволяють отримати товщину багатокристалльної 3-D-мікросхеми меншу, ніж однокристалльної, виготовленій по традиційній технології.

Технологія виробництва 3-D-мікросхем дозволяє суміщати в одному корпусі кристали різного призначення і різних габаритів, використовуючи різноманітні способи монтажу. Разом з кристалами можна монтувати пасивні компоненти, отримуючи в підсумку перевірений функціональний вузол, - гібридний інтегральний модуль чи гібридну інтегральну мікросхему, - мінімальних габаритів з відмінними характеристиками. Проблеми вивідного монтажу виводять на чільні позиції у виробництві мікроелектронних виробів. Однією з цих проблем є пошук шляхів зменшення електричного опору контактної-провідникової системи ІС.

1.2. Сучасні технології упакування і мікромонтажу кристалів інтегральних схем

За тривалий час розвитку мікроелектроніки (від кінця 50-х – поч. 60-х років ХХ ст.) різними фірмами розроблено різні конструкції корпусів. Застосовують також різні технології їх виготовлення. Фірмою Freescale Semiconductor освоєні такі технології виготовлення корпусів мікросхем: SiP (system in package), PoP (package on package) та впроваджуються нова RCP (redistributed chip packaging). У 90-х роках

минулого сторіччя з'явилися нові мікросхеми, які замінили багатокристалльні модулі. Вони вміщували кристали різного призначення (процесор, пам'ять і спеціалізовані логічні схеми), змонтовані на одній підкладці. Такі мікросхеми отримали назву «системи в корпусі» в силу своєї функціональної ідентичності з системами на кристалі. За зовнішнім видом і способом монтажу вони не відрізняються від мікросхем в корпусі BGA. Дана технологія дозволяє розміщувати в одному корпусі на загальній підкладці декілька кристалів мікросхем, в результаті чого площа, що вони займаються, значно скорочується. Мікросхеми SiP приваблюють розробників портативних пристроїв ще деякими перевагами, зокрема, в корпусі мікросхеми можуть бути розміщені пасивні компоненти, антени, фільтри, екрани тощо, що зменшує рівень паразитних випромінювань, покращує екранування і збільшує швидкодію мікросхеми.

Отже виходить, по суті технологія SiP є новим різновидом відомої гібридної технології виготовлення IC. Вперше технологія SiP, була використана фірмою Freescale у 2000 р., об'єднавши кристали процесора і запам'ятовуючого пристрою в одному корпусі. Наступним кроком розвитку цієї технології стала технологія PoP, згідно якої мікросхеми розташовують одна на одну.

Для з'єднання кристалів з виводами корпусів SiP і PoP використовується дротяний монтаж, який дістав широке застосування при встановленні кристалів в корпус. На поверхні кристалу мікросхем нараховується велика кількість виводів, площинки під ці виводи займають значну частину загальної площі кристалу, із-за чого зменшується площа активних елементів мікросхеми. Тому для КМОН-мікросхем фірма Freescale освоїла технологію виготовлення площинок з кроком 35-37 мкм.

Фірмою Freescale Semiconductor розроблена нова технологія упакування кристалів в корпус, яка отримала назву redistributed chip packaging (RCP). В цій технології використання підкладок повністю усувається. Виводи тут з'єднуються безпосередньо з кристалом, що дозволяє отримати корпус меншого розміру з більш

густим розташуванням виводів. Корпус тут формується навкруг кристалу. Розміри мікросхем з великим кроком виводів зменшуються при цьому на 50%.

В надтонкому корпусі Leadless Leadframe Package (LPP) товщиною 0,4 мм, який представляє собою CSP-корпус (Chip Scale Package), що виготовляється з допомогою вивідної рамки, також застосовується дротяний монтаж. Згідно даних фірми TeachSearch International впродовж найближчих декількох років число мікросхем в CSP-корпусах буде зростати на 30% в рік. Ці корпуси також відомі, як DFN (Dual Flat No-lead) і QFN (Quad Flat No-lead), дивлячись на те, чи розташовані контактні площинки з обох або чотирьох чторін корпусу.

Для позначення технології розміщення декількох кристалів мікросхем на спільній підкладці у середині 90-х років з'явився термін MCM (multichip module – багатокристальний модуль). У той час активно розроблялися нові види підкладок, розташування з'єднань в яких повинно було забезпечити збільшення швидкодії мікросхем. Сучасний корпус розглядався як допоміжний компонент мікросхеми, що забезпечує швидкодію в поєднанні з мінімальними габаритами і вагою для застосування у виробках, для яких мінімальна вартість не є вирішальним фактором. Тому за MCM-технологією закріпилася репутація затратної, придатною лише для вирішення вузького кола задач. Вироби MCM (multichip module) або MCP (multichip package) – це як правило мікросхеми часткового застосування, які вміщують десятки і сотні компонентів і які мають великі габарити і високу густину розташування кристалів.

Зростання кількості управляючих пристроїв в автомобільній електроніці, обчислювальній техніці, системах передачі даних, виробках військового призначення та побутових пристроях викликало потребу створення мікросхем менших габаритів, більш високої ступені інтеграції, продуктивності і надійності, з меншими витратами на їх виготовлення. Цим дещо суперечливим вимогам як ніяк більше відповідають мікросхеми, що позначаються як «die products». Термін «die products» позначає мікросхеми, розміри яких визначаються розмірами кристалу. Він охоплює як мікросхеми, виготовлені за новою технологією «wafer level

packaging» (WLP), так із застосуванням широко відомих методів з'єднання: за допомогою золотого мікродроту і технології flip-chip. Технологія WLP передбачає, що формування виводів і тестування мікросхем здійснюється до різки кремнієвої пластини. Сформовані за цією технологією виводи мають різки кремнієвої пластини. Сформовані за цією технологією виводи мають більший діаметр і крок між ними, ніж в мікросхемах flip-chip. Це зменшує дію сил, що виникають при зміні температури, а також полегшує монтаж кристалів на стандартних лініях поверхневого монтажу. Однією із причин розвитку технологій WLP і CSP було прагнення виробників мікросхем відмовитися від використання недоливка. Окрім згаданої вище компенсації механічних напружень недоливок служить амортизатором для кристалів мікросхем, які витримують ударні навантаження. Кристали малих розмірів, виготовленні за технологіями WLP і CSP більш стійкі до механічних навантажень, тому необхідність в недоливку зменшується.

Число мікросхем «die products», особливо безкорпусних мікросхем, а також виконаних з просторовим розташуванням кристалів збільшується. Мікросхеми «die products» відрізняються більш короткою довжиною з'єднувальних провідників, що забезпечує збільшення швидкості розповсюдження сигналів. Розташування пасивних компонентів біля виводів кристалу сприяє підвищенню його максимальної робочої частоти.

Аналіз різних способів сучасного корпусування ІС показує, що мікроконтактні з'єднання з використанням традиційного дротяного мікромонтажу та з допомогою стовпчиккових і кулькових виводів є нині найбільш застосовуваним в ІС. Тому, дослідження і оптимізація електричних параметрів конструкцій цих МКЗ є актуальним.

2. СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ КОНТРОЛЮ МІКРОКОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ

2.1. Контроль якості електричного з'єднання кристалу інтегральної схеми із контактними площинками плати

Після виготовлення МКЗ здійснюють контроль його якості згідно тих вимог, які ставляться до нього. Основним параметром МКЗ є його електричний опір. МКЗ вважається якісним, якщо його електропровідність є достатньо високою, тобто не впливає на сигнали, що передаються та, в загальному, на параметри ІС. При необхідності перевіряють й інші параметри – рівень шумів, адгезію тощо. Якість дротяних МКЗ перевіряють і гарантують, як правило, двома методами:

- візуальним оглядом (під мікроскопом);
- прикладанням стандартного механічного навантаження до мікроконтактного з'єднання.

Для контролю якості жорстких МКЗ використовують рентгенівський метод. Задачі кількісного визначення параметрів, у тому числі опору, провідникових елементів та мікроконтактів ІС та мікрозбірок, ставляться у сучасних дослідженнях. Візуальним оглядом і прикладанням стандартного механічного навантаження не можна визначити електропровідність МКЗ, а тільки побічно оцінити її наявність чи відсутність. Для її визначення існують спеціальні методи. Кожен із цих методів має як переваги так і недоліки. З метою удосконалення існуючих методів були розроблені і запатентовані (отримані авторські свідоцтва на винаходи А.с. №1492309 і №1250982) нові способи вимірювання опору мікроконтактного з'єднання дроту і плівкового провідника, які розглянуті нижче.

2.2. Систематизація способів вимірювання електричного опору мікроконтактних з'єднань

МКЗ належать до низькоомних елементів ІС. Тому для визначення його опору потрібно застосувати спеціальні способи, які дозволяють вимірювати малі опори. Існують різні способи вимірювання опору низькоомних МКЗ. Однак опис їх наведено в різних джерелах і тому вони потребують систематизації. Найчастіше для вимірювання низькоомних елементів використовують метод амперметра-вольтметра та різні мостові схеми. Відомі на сьогодні способи вимірювання опору відзначаються або складністю або не завжди задовольняють достатню точність. Основними проблемами, які доводиться при цьому вирішувати є усунення або зменшення впливу на результат вимірювання контактних опорів вимірюваних зондів, величина яких є одного порядку з опором мікроконтактного з'єднання, а також опорів ділянок дроту і плівкового провідника, які при вимірюванні входять в ділянку поміж вимірюваними зондами.

2.2.1. Метод вимірювального моста

Для вимірювання опорів в електровимірювальній техніці широко застосовуються вимірювальні кола, які отримали назву мостових. На рис. 2.1. наведена схема чотиризатискного під'єднання вимірюваного опору, яка застосовується для вимірювання малих опорів (менше 10 Ом). Вимірювальний опір під'єднується до чотирьох затискачів 1, 2, 3 і 4. При цьому перемички між зазначеними затискачами знімаються, точки А і 4, Б і 1 з'єднуються між собою (пунктирні лінії на рис. 2.1). Цьому випадку опір з'єднувального провідника від R_x до затискача 2 входить в плече опору R_3 , а опір з'єднувального провідника від R_x до затискача 3 – в плече опору R_1 . Опори резисторів R_3 і R_1 значно більші провідників практично не виявляють впливу на точність результату вимірювання. Опори з'єднувальних провідників від затискачів R_x до затискачів 1 і 4 входять у

вітки діагоналей живлення і навантаження, тому також не впливають на результат вимірювання у режимі рівноваги.

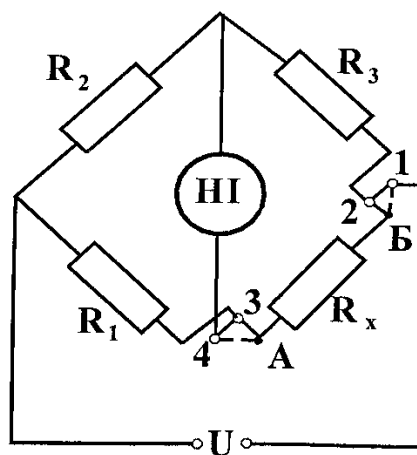


Рисунок 2.1 – Схема чотиритатисного під'єднання вимірювального опору

Застосування розглянутої на рис. 2.1. схеми для вимірювання малих опорів обмежується чутливістю мостової схеми, тому при вимірюванні опорів менше 10 Ом перевагу віддають схемі подвійного моста.

2.2.2. Метод вимірювання струму і напруги

Було запропоновано спосіб, який назвали «метод вимірювання струсу і напруги», в якому з метою зменшення впливу контактних опорів на результат вимірювання, на напруга U на контакті вимірювалася мілівольтметром електростатичного типу або мілівольтметром, що має великий опір. Приварений до плівки **а** в точці **О** мікродріт **1** вмикався в схему, зображену на рис. 2.2. через контакт пропускався струс I від постійного джерела напруги, який вимірювався міліамперметром і міг регулюватися в широких межах з допомогою реостату **Р**. При цьому опір контакту визначався за формулою:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Тобто фактично запропонований метод є одним із різновидів способу амперметра-вольтметра. Однак, в цьому способі у результаті вимірювання, окрім опору власне контакту, входить опір провідникової плівки, який назвали опором стягування ліній струму в плівці. Він розраховується за формулою. Представлення електричного поля в плівці між двома круглими контактами як

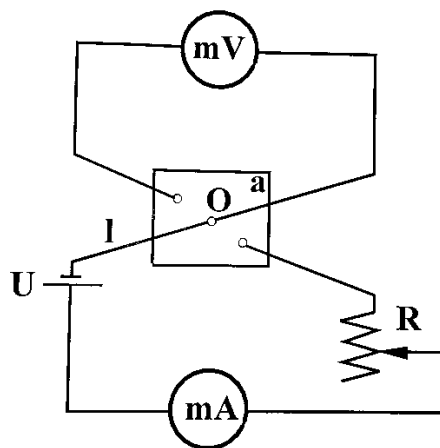


Рисунок 2.2 – Схема вимірювання опору МКЗ методом вимірювання струму і напруги

поля двох паралельних нескінченно довгих циліндричних провідників є науково дискусійним, бо дроти-провідники знаходяться на поверхні, а не всередині плівки, де протікає струм. Теоретично розраховане значення R_{cm} – 87% від повного опору контакту, показує, що опір провідникової плівки може суттєво впливати на результат вимірювання опору контакту і, відповідно, на точність вимірювання, а точність розрахунку не визначена. Перехідний контактний опір визначався шляхом віднімання теоретично розрахованого опору плівки R_{cm} від повного опору контакту. Метод належить до непрямих способів вимірювання опору МКЗ.

2.3. Аналіз вищевикладеного матеріалу

Розглянуто і систематизовано способи вимірювання електричного опору МКЗ. Виявлено дві основні групи вимірювання електричного МКЗ: мостові методи і методи вимірювання струму і напруги. Показано, що при використанні одинарного моста, у виміряний результат входять опори ділянок плівкового і дротяного провідників, що примикають до МКЗ, а також певна частина контактних опорів вимірювальних зондів, що зменшує точність вимірювання. Цей недолік усувається при застосуванні так званого чотириплечого мосту, однак, у цьому разі потрібно виготовлення спеціального взірця з трьома контактами.

Показано, що при використанні для визначення опору МКЗ методу вимірювання струму і напруги у результат вимірювання, окрім опору власне контакту, входить опір провідникової плівки, який називається опором стягування ліній струму в плівці. Він розраховується за спеціальною формулою. Теоретично розрахована величина опору стягування – до 87% від повного опору контакту є значною і показує, що опір провідникової плівки суттєво впливає на результат вимірювання опору контакту. Оскільки точність розрахунку при цьому не визначена, то невизначеною є точність визначення опору МКЗ за цим способом.

3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ОПОРУ ГНУЧКИХ ДРОТЯНИХ ТА ЖОРСТКИХ СТОВПЧИКОВИХ МОНТАЖНИХ З'ЄДНАНЬ ІС

3.1. Розробка моделі електричного опору дротяного накладного МКЗ

Збільшення степені інтеграції ІС ті їх швидкодії змушує дослідників звертати увагу на покращення параметрів провідникових елементів. Розміри провідникових елементів стали настільки малими (долі мікрона), що на роботу пристрою почав впливати їхній електричний опір. Представникам компанії Motorola вдалося виготовити працюючі зразки багат шарових мікросхем з мідними провідниками. Компанія IBM розпочала новий виробничий процес з використання міді, дякуючи якому досягається більша компактність, зростає продуктивність, знижується собівартість процесорів та інтегральних мікросхем. Використання міді підвищує швидкість процесорів, оскільки зменшуються розміри кристалів. Дякуючи компактності мікросхем скорочуються шляхи проходження електронів, тобто їх «подорожі» в кристалі стають коротшими. Певного роду перешкоди на шляху підвищення швидкодії кристалів створюють мікроскопічні алюмінієві провідники, які з'єднують елементи і компоненти мікросхем. Із зниженням проектних норм все сильніше впливає електричний опір алюмінію, що призводить до обмеження продуктивності. Інакше кажучи, короткі подорожі не стають швидшими на повільних дорогах. Мідь володіє меншим, ніж алюміній, опором. Це дозволило IBM зменшити нижню межу лінійного розміру провідникових елементів на 20% порівняно з алюмінієвими провідниками. Можна припустити, що подібні залежності повинні були б існувати і для дротяних з'єднувальних провідників між підкладкою ГІС і зовнішніми виводами. Для визначення шляхів зменшення їхнього опору нами були розроблені модулі накладного дротяного з'єднання і перехідної ланки між внутрішніми і зовнішнім виводом ІС.

Нами запропонована модель накладного з'єднання на підкладці A (рис. 3.1), в якому ширина деформованої частини дроту рівна B , деформована частина і плівковий провідник перекриваються по довжині l і розділені в області перекриття деяким умовним перехідним шаром. Прийнято, що умовний перехідний шар утворюють дискретні осередки захоплення і що вказані осередки рівномірно розподілені по довжині l . Позначивши через $r_1 = \rho_1/Bh$ і $r_2 = \rho_2/bt$ погонні опори деформованої частини дроту і плівкового провідника (експериментально було встановлено, що ділянка плівкового провідника з розміром c на опір контактного з'єднання суттєвого впливу не виявляє), а через $y = b/\rho_n$ погонну провідність перехідного шару, переходимо до плоскої моделі і розглядаємо еквівалентні схеми з розподіленими параметрами (рис.3.1).

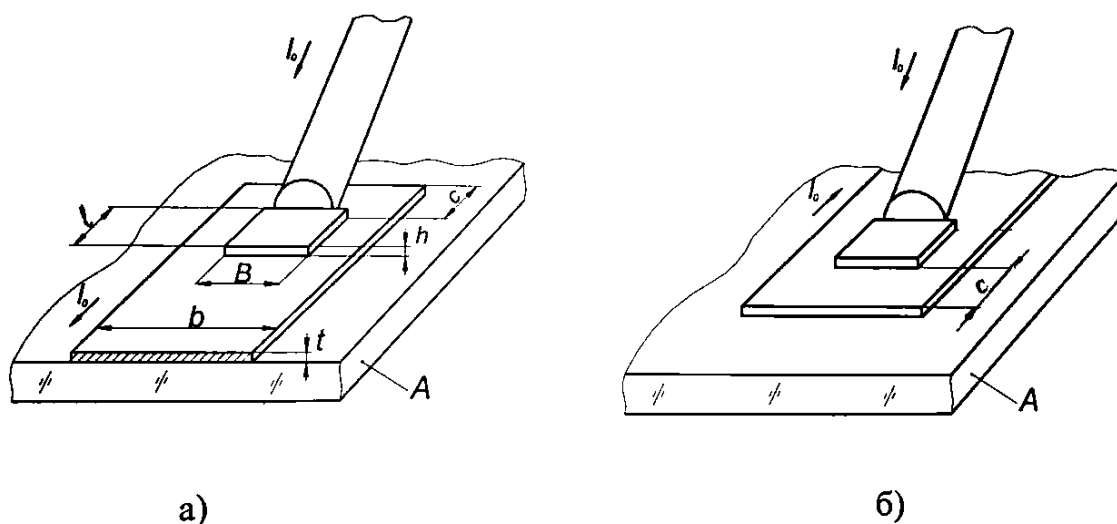


Рисунок 3.1 – Моделі накладного з'єднання дроту і плівкового провідника: а – перший випадок, б – другий випадок

Виділивши в кожній з еквівалентних схем елемент структури dx і застосувавши до струмів і напруг у цьому елементі закони Кірхгофа, отримано системи диференціальних рівнянь:

для першого випадку (рис. 3.1, а):

$$\begin{cases} \frac{d^2 \cdot U}{dx^2} = y(r_1 + r_2)U; \\ \frac{d^2 I_1}{dx^2} = y(r_1 + r_2)I_1 + y_2 I_0; \end{cases} \quad (3.1) \dots (3.2)$$

для другого випадку (рис. 3.1, б):

$$\begin{cases} \frac{d^2 \cdot U}{dx^2} = y(r_1 + r_2)U; \\ \frac{d^2 I_1}{dx^2} = y(r_1 + r_2)I_1. \end{cases} \quad (3.3) \dots (3.4)$$

Розв'язавши системи рівнянь (3.1...3.4) з врахуванням початкових умов:

$$I_{1(x=0)} = I_0 \text{ і } I_{1(x=l)} = 0, \quad (3.5)$$

знайдено величини спадів напруг на початку області перекриття U_{ex} і вздовж

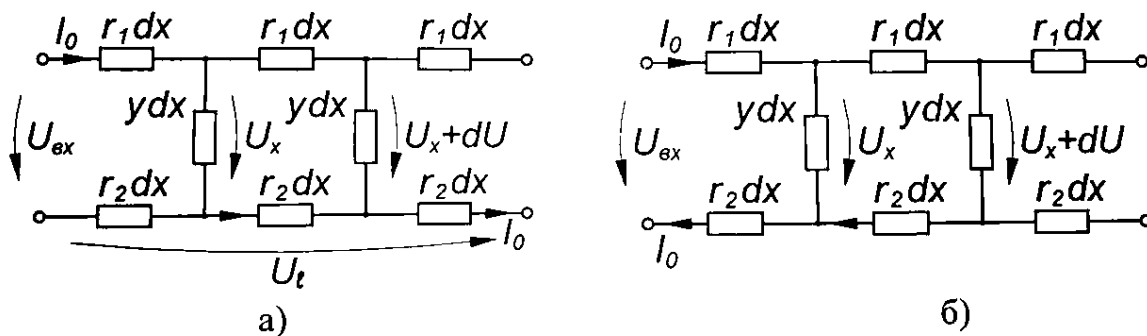


Рис. 3.2. Еквівалентні схеми накладного з'єднання дроту і плівкового провідника:
а – перший випадок, б – другий випадок

Контакту U_l . Для першого випадку спад напруги на контактному з'єднанні буде рівний сумі спадів напруг U_{ex} та U_l , для другого – напрузі U_{ex} . Розділивши величину

спаду напруги на контактному з'єднанні на протікаючий через нього струм, знайдено його опір:

для першого випадку

$$R_k = \frac{r_1^2 + r_2^2}{(r_1 + r_2)\alpha \cdot th(\alpha l)} + \frac{2r_1 r_2}{(r_1 + r_2)\alpha \cdot sh(\alpha l)} + \frac{r_1 r_2 l}{r_1 + r_2}; \quad (3.6)$$

для другого випадку

$$R_k = \frac{r_1 + r_2}{\alpha \cdot th \alpha l}, \quad (3.7)$$

$$\text{де } \alpha = \sqrt{y(r_1 + r_2)}. \quad (3.8)$$

Вираз аналогічний (3.6) отримано в роботі для опору ідеалізованої моделі плівкового контакту, яка розглянута в розділі 1. Для технічного аналізу опору мікроконтактного з'єднання більш зручним є простіший вираз (3.7). З виразів (3.6)...(3.7) видно, що R_k залежить від геометричних розмірів контактного з'єднання, які визначають r_{k1} і r_{k2} та від опору, який вноситься перехідним шаром:

$$R_{kp} = \frac{\rho_n}{Bl} = \frac{1}{yl}. \quad (3.9)$$

Опір, що вноситься умовним перехідним шаром, називається контактним і в нього входить опір стягування на α -плямах. Для визначення параметру y із виразів (3.7) і (3.9) була розроблена спеціальна програма на мові СЯК і паралельно (для

усунення випадкової похибки) на мові Паскаль. Опір R_k вимірюється відомими способами. За допомогою способу, вимірювалися опори термокомпресійних контактних з'єднань *Аи*-дроту і плівкового провідника із срібної пасти 3713. Поверхня плівкового провідника перед виконанням контактування підлягала обробці полірувальними кругами із застосуванням алмазної пасти АСМ2/1. Товщина плівки після полірування склала 8 мкм, діаметр дроту, який приварювався – 40 мкм. Вимірювані опори групи контактних з'єднань знаходилися в межах $R_k = 0,054...0,072$ Ом. На основі проведених вимірювань за формулами (3.6)...(3.9) були розраховані контактні опори. Їх величина склала $R_{kn} = 0,062 \pm 0,009$ Ом. Це показує, що для даного випадку опір контактного з'єднання, в основному, визначається контактним опором. Контактний опір залежить від фактичної площі контакту і виражається через його параметр – величину питомого перехідного контактного опору. Для контактних з'єднань *Аи*-дроту і плівкового провідника зі срібної пасти величина питомого опору склала $\rho_n = 3,97 \cdot 10^{-6}$ Ом*см².

Аналіз розглянутих моделей показує, що електричний опір мікроконтактного з'єднання (який сам є важливим інформативним параметром), входить декілька складових, найважливішими з яких є опір стягування ліній струму в плівці для моделі торцевого з'єднання і перехідний контактний опір для моделі накладного з'єднання.

Таким чином, отримано математичні вирази, які визначають опір дротяного накладного МКЗ, пов'язуючи його з конструктивно-технологічними параметрами. Кількісна оцінка впливу конструктивних-технологічних параметрів на опір МКЗ проведена в розділі 4.

3.2. Моделювання впливу способу з'єднання стовпчикових виводів інтегральних схем на їх опір

Роль МКЗ в забезпеченні працездатності ІС постійно зростає, оскільки при збільшенні степені інтеграції ІС, їх кількість також збільшується. Значне

збільшення кількості МКЗ приводить до зростання їх загального електричного опору і збільшення шляху проходження сигналів, що, в свою чергу, викликає затримку сигналів і збільшує витрати електричної енергії. Щоб виявити шляхи зменшення опору, необхідно визначити із яких складових воно складається і здійснити їх кількісну оцінку. Тому аналіз складових електричного опору і кількісне визначення їх вкладу в сумарний опір вузла інтегральної схеми є актуальною задачею.

Контактні конструкції класифікуються за різними конструктивними і технологічними ознаками. За механічною ознакою всі конструкції МКЗ поділяють на гнучкі і жорсткі. Стовпчикові (кулькові) виводи інтегральних мікросхем належать до класу жорстких мікроконтактних з'єднань (ЖМКЗ).

Стовпчикові (кулькові) виводи застосовуються в сучасних ІС при монтажі безкорпусних напівпровідникових елементів, а також в різних корпусах типу Intel®Stacked-CSP, BGA та ін. Оскільки в цьому способі напівпровідниковий елемент повернутий лицевою стороною до підкладки ГІС, то такий монтаж називається повернутим. В даний час більшість корпусів мікросхем, що основуються на перевернутому розташуванні кристалу, використовують сферичні каплі припою, які компенсують механічні напруження, що викликаються тепловою або механічною дією на кристал. Типовий приклад формування стовпчикових виводів ("bump") на поверхні кристалу наведений на рис. 3.3. На алюмінієву контактну площинку кристалу (рис. 3.3, а) початково наноситься хімічне покриття із нікеля і золота (рис. 3.3, б). Нікелеве покриття служить в якості адгезійного шару і одночасно дифузійного бар'єру між припоєм і алюмінієвою площинкою. Тонкий шар золота на поверхні нікелевого покриття служить для захисту від окиснення. На наступному етапі на поверхню контактної площинки методом трафаретного друку наноситься спеціальна дрібнодисперсна паяльна паста (рис. 3.3, в). Завершальне формування виводу здійснюється при оплавленні паяльної пасти за рахунок нагріву в атмосфері інертного газу (рис. 3.3, г).

Окрім олов'яно-свинцевих виводів (рис. 3.3), в даний час використовуються також інші способи жорсткого монтажу – формування золотих стовпчикових виводів гальванічним методом і при цьому утворення контакту з площинками підкладками ГІС ультразвуковим або термокомпресійним способом приклеювання виводів кристалу до підкладки з допомогою електропровідного клею. Рідше застосовуються конструкції жорсткого мікроконтактного з'єднання (ЖМКЗ) з мідною кулькою, алюмінієві та ін. Форма виводу може бути різною – кулеподібною, циліндроподібною, трапецевидною тощо.

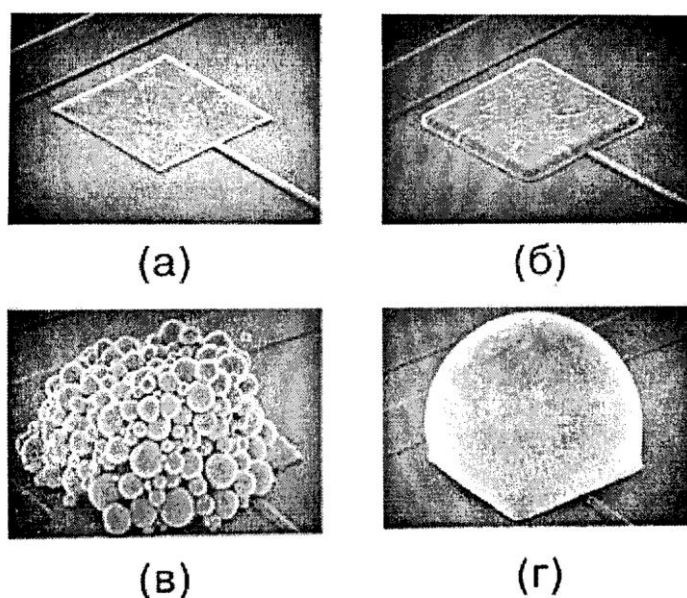


Рисунок 3.3 – Послідовні стадії формування стовпчикового виводу на контактній площинці кристалу

З'єднання на основі жорстких виводів характеризується технічними параметрами: електричним опором, рівнем шумів, міцністю з'єднання. Головною вимогою, яка ставиться до ЖМКЗ, є створення надійного контакту з'єднувальних елементів, тобто контактних площинок кристалу і підкладки ГІС, при забезпеченні низького електричного опору всього з'єднання. Таким чином, електричний опір входить в число найважливіших параметрів ЖМКЗ.

Оскільки напівпровідниковий кристал перевернутий і його контактні площинки знаходяться всередині конструкції, то при вимірюванні опору жорстких контактних виводів виникають проблеми, пов'язані з під'єднанням вимірювальних зондів. Тому для визначення електричного опору золотих і припійних стовпчикових виводів пропонується використовувати моделювання. Моделювання дозволяє оцінити досліджуваний параметр без безпосереднього проведення його вимірювання, однак використовуючи при цьому результати аналогічних вимірювань. В даному випадку використовуються результати визначення опору контактної площинки і перехідної зони для мікродротяного з'єднання.

Результати дослідження. Як було вказано, жорстке мікроконтактне з'єднання або контактний вузол складаються із контактної площинки кристалу, проміжної ланки (стовпчика-виводу) і контактної площинки ГІС. Така побудова конструкції відображена в запропонованій нами моделі ЖМКЗ. Для дослідження вибрана прямокутна форма жорсткого виводу, оскільки в цьому випадку математичні вирази, які описують загальний електричний опір ЖМКЗ зручно виводити аналітичним шляхом. Результати аналізу опору контактного вузла зі стовпчиком-виводом прямокутної форми з певним ступенем наближення можна застосувати і до контактних вузлів зі стовпчиками-виводами інших форм при умові однаковості площ контактування цих стовпчиків-виводів з контактними площинками кристалу і підкладки ГІС. При більш точному підході необхідно враховувати не тільки величину, але і форму контактної площинки. Як буде показано далі, опір самого стовпчика-виводу не є визначаючим в контактному вузлі.

Модель, яка використана для дослідження опору ЖМКЗ, показана на рис. 3.11. Модель складається із контактної площинки 2, яка нанесена на підкладку 1 ГІС, стовпчика-виводу 4, перехідної зони 3 між контактною площиною ГІС і стовпчиком-виводом, контактної площинки 6, яка нанесена на напівпровідниковий елемент 7 і перехідної зони 5 між стовпчиком-виводом і контактною площиною напівпровідникового елемента. В моделі прийнято, що контактна площинка 6

лежить на діелектричному шарі, наприклад, двоокису кремнію (діелектричний шар на рис. 3.4 умовно не показаний). Виходячи із сказаного і показаного на рис. 3.4 вираз для сумарного опору стовпчикового виводу запишеться у вигляді:

$$R_{ксв} = R_{кnn1} + R_{n3l} + R_{\phi} + R_{n32} + R_{кнк2}, \quad (3.10)$$

де $R_{кnn1}$ – опір контактної площинки ГІС, R_{n3l} – опір перехідної зони між контактною площиною підкладки і виводом, R_{ϕ} – опір стовпчика-виводу, R_{n32} – опір перехідної зони між контактною площиною кристалу і виводом, $R_{кнк2}$ – опір контактної площинки кристалу.

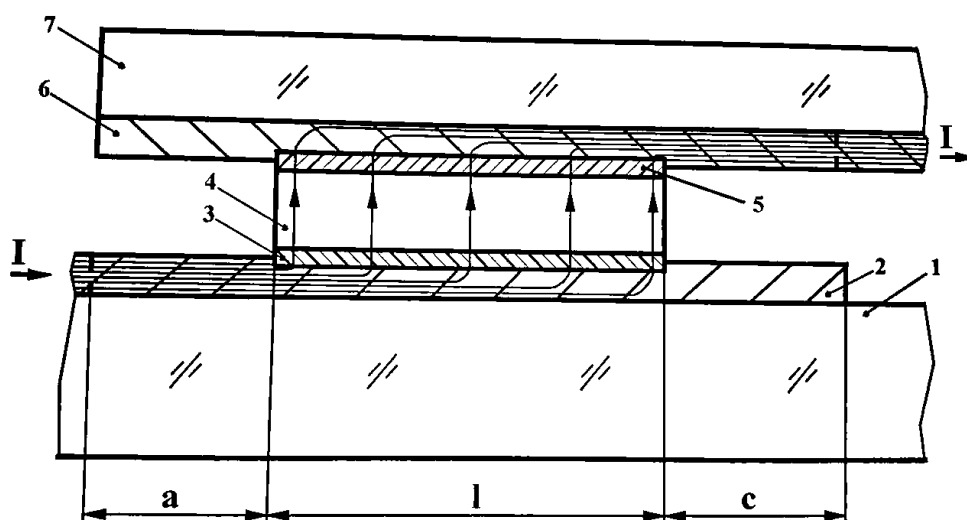


Рисунок 3.4 – Конструктивна модель жорсткого контактного з'єднання: 1 – підкладка гібридної ІС, 2 – контактна площинка підкладки гібридної ІС, 3 – зона взаємопроникнення матеріалу виводу і контактної площинки підкладки ГІС, 4 – жорсткий стовпчик-вывід, 5 – зона взаємопроникнення матеріалу виводу і контактної площинки напівпровідникового елемента, 6 – контактна площинка напівпровідникового елемента, 7 – навісний напівпровідниковий елемент, a – довжина передвиводної частини контактної площинки, l – довжина підвиводної частини контактної площинки, c – довжина післявиводної частини контактної

площинки (діелектричні, адгезійні і захисні шари умовно не показані, I – струм, що протікає через вивід)

В даному дослідженні розміри контактних площинок напівпровідникового кристалу і підкладки ГІС прийняті однаковими. Опір контактної площинки представимо у вигляді суми двох складових (рис. 3.5):

$$R_{кпл} = R_{кпл1} + R_{кпл2}, \quad (3.11)$$

де $R_{кпл1}$ – опір передвивідної (за напрямком струму) частини контактної площинки довжиною a , $R_{кпл2}$ – опір підвивідної частини контактної площинки довжиною l . Експериментально встановлено, що частина контактної площинки довжиною c (рис. 3.5) не впливає суттєво на її опір.

Розмір контактної площинки залежить від розміру стовпчика-виводу і від точності системи суміщення установки з'єднання. Мінімальний її розмір повинен бути більшим за максимальний поперечний розмір виводу на величину точності його суміщення з контактною площиною.

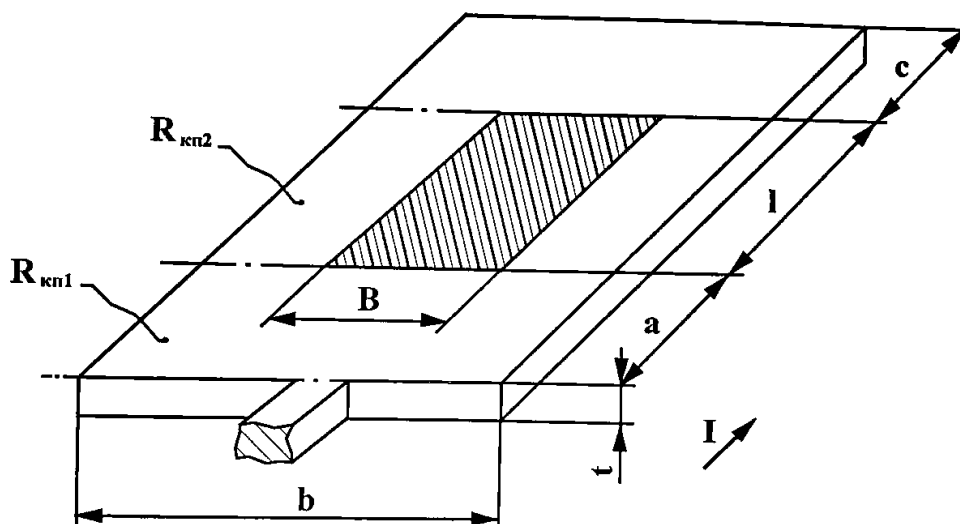


Рисунок 3.5 – Складові частини контактної площинки, які визначають її опір: R_{kn1} – опір, що розраховується за формулою (3.12), R_{kn2} – опір, що розраховується за формулами (3.13)...(3.20). Заштрихованою показана область, що займається стовпчиком-виводом, а стрілкою – напрямком струму

Складова опору R_{kn1} визначається формулою:

$$R_{kn1} = \rho_2 * a / b * t, \quad (3.12)$$

де a – довжина передвивідної частини контактної площинки за напрямком протікання струму, яка залежить від точності системи суміщення установки з'єднання і розмірів стовпчика-виводу.

Внаслідок нерівномірності розподілу ліній струму в підвивідній частині плівкової контактної площинки розрахунок цієї складової електричного опору R_{kn2} представляє певні труднощі. Тому, щоб визначити опір контактних площинок, а також перехідних зон, використаємо результати дослідження моделі накладного мікроконтактного з'єднання дроту і плівки. Опори контактних площинок одного розміру і із однакового матеріалу при подібності форми і при рівності площ контактування як для дротяного так і для стовпчикового виводів будуть однаковими. Методика розрахунку наступна.

Розраховується опір мікродротяного з'єднання, площа якого рівна площі контакту стовпчикового виводу згідно заданого питомого перехідного контактного опору ρ_n для даної контактної пари за формулами (3.6...3.8). Для моделі, показаної на рис. 3.4 використаємо формулу (3.6). У формулах (3.6...3.8) приймаємо: R_k – опір мікроконтактного з'єднання дроту і підвивідної частини контактної площинки, ρ_1 , ρ_2 – питомі опори мікродроту і контактної площинки, h – товщина деформованої частини дроту, t – товщина контактної площинки, b – ширина

контактної площинки, B – ширина деформованої частини дроту, y – погінна провідність умовного перехідного шару.

Розраховується перехідний контактний опір R_{kn} за формулою (3.9), у якій l – довжина деформованої частини дроту.

Визначається сумарний опір підвивідної частини контактної площинки і деформованої частини дроту за формулою:

$$R_{кп\partial} = R_k - R_{kn} \quad (3.13)$$

Розраховується співвідношення погінних опорів r_1 і r_2 і прийнявши це співвідношення і для самих опорів, із сумарного $R_{кп\partial}$ визначається опір підвивідної частини контактної площинки:

$$R_{кп2} = \frac{R_{кп\partial}}{1 + \frac{r_1}{r_2}}. \quad (3.14)$$

Розраховується опір підвивідної частини контактної площинки приймаємо і для стовпчикowego виводу, який має зі своєю контактною площиною таку ж величину і форму площі контактування.

Тоді, згідно (3.11) повний опір контактної площинки:

$$R_{кп2} = \frac{R_{кп\partial}}{1 + \frac{r_1}{r_2}} + \frac{c_2 \cdot a}{b \cdot t}. \quad (3.15)$$

Для визначення опору багатошарових контактних площинок використовуємо їх приведені питомі опори. Для послідовного з'єднання шарів приведений питомий опір контактної площинки визначається за формулою:

$$\rho_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \frac{t_i}{t}, \quad (3.16)$$

де ρ_i – питомий опір i -го шару, t_i – товщина i -го шару, t – сумарна товщина контактної площинки.

Для паралельного з'єднання шарів приведений питомий опір контактної площинки визначається за формулою:

$$\rho_{\text{пр}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_i} \cdot \frac{t_i}{t}}. \quad (3.17)$$

В разі використання багатошарової контактної площинки в контактному вузлі (рис. 3.4) при проходженні струму буде два варіанти з'єднання шарів: паралельне з'єднання – для передвивідної частини контактної площинки, і змішане послідовно-паралельне з'єднання шарів – для підвивідної частини контактної площинки, тому, у другому випадку, визначивши приведені питомі опори за формулами 3.16 і 3.17 візьмемо умовне середнє його значення.

Опір передніх зон між контактною площиною і виводом у випадку твердофазної зварки визначається за формулою:

$$R_{\text{нз}} = \rho_{\text{н}}/F, \quad (3.18)$$

де F – площа контактування, яка рівна площі поперечного січення виводу.

Опір перехідних зон між контактними площинками і виводом у разі припійного з'єднання визначається за формулою:

$$R_{nz} = \rho_{nz} * t_{nz} / F, \quad (3.19)$$

де ρ_{nz} – питомий опір перехідної зони, t_{nz} – товщина перехідної припойної зони, F – площа контактування, яка рівна площі поперечного січення стовпчикового виводу.

Опір клеєвого шару між контактною площинкою і виводом у разі клеєвого з'єднання визначається за формулою:

$$R_{kc} = \rho_k * t_{kc} / F, \quad (3.20)$$

де ρ_k – питомий опір клею, t_{kc} – товщина клеєвого шару, F – площа контактування, яка дорівнює площі поперечного січення стовпчикового виводу.

Опір стовпчика-виводу визначається за формулою:

$$R_v = \rho_v * h_l / F, \quad (3.21)$$

де ρ_v – питомий опір виводу, h_l – його висота, F – площа поперечного січення виводу.

Формули (3.12...3.21) показують, що опір стовпчикового виводу залежить від його геометричних розмірів і електропровідності складових частин, тобто їх можна

використати для кількісного аналізу його залежності від конструктивно-технологічних параметрів і він проведений в наступному розділі 4.

Окрім електричного опору ще одним важливим параметром, що визначає якісну роботу саме жорсткого ЖМКЗ є величина внутрішніх механічних напружень. Оцінювання ЖМКЗ за величиною електричного опору і величиною внутрішніх механічних напружень дає цілісну картину якісної і надійної його роботи в процесі експлуатації.

3.3. Висновки до розглянутого розділу

Розроблено і досліджено фізичну модель дротяного МКЗ і математичну модель його електричного опору. Отримано математичні вирази, які визначають опір дротяного накладного МКЗ, пов'язуючи його з конструктивно-технологічними параметрами. На основі проведених досліджень вперше визначено питомий перехідний контактний опір для термокомпресійних з'єднань *Аи*-дроту і плівкового провідника зі срібної пасти. Його величина склала $\rho_n = 3,97 \cdot 10^{-6}$ Ом*см². Запропоновану модель електричного опору накладного дротяного мікроконтактного з'єднання рекомендовано використовувати при проектуванні ІС.

Розроблено методику визначення опору контактної площинки жорсткого мікроконтактного з'єднання ГІС, в якій враховується нерівномірність розподілу струму вздовж контакту, а також методику визначення електричного опору жорсткого виводу ГІС (на основі розробленої методики визначення опору контактної площинки), яка враховує вплив на нього опорів конструктивних складових (контактних площинок кристалу і підкладки ГІС з нерівномірним розподілом струму, перехідних зон і стовпчика). Запропоновані методики дають можливість оцінити ступінь впливу технологічного способу з'єднання на опір МКЗ.

4. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ МІКРОКОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ ІС

Степінь сучасних ІС та густина компоновки мікроплат постійно зростають. При цьому збільшується кількість внутрішніх і зовнішніх мікроконтактних з'єднань на провідникових елементів при одночасному зменшенні їхніх геометричних розмірів. Але при пропорційному зменшенні розмірів провідникових елементів зростає їх електричний опір, про що було зауважено в розділі 1 і що погіршує параметри ІС. Тому актуальною задачею є розробка низькоомних конструктивних елементів МКЗ, способів їх виготовлення і визначення шляхів зменшення опору за рахунок зміни їх конструктивних розмірів.

4.1. Розробка та дослідження комбінованого способу виготовлення низькоомних контактних площинок мікроплати гібридної ІС

Традиційний тонкоплівковий спосіб виготовлення контактних площинок і з'єднувальних провідників, у тому числі, для пристроїв НВЧ-діапазону, не дозволяє до сих пір успішно перебороти основний недолік – наявність адгезійного (резистивного) підшару. В двосантиметровому діапазоні довжин хвиль область протікання струму визначається товщиною скін-шару, меншою 1 мкм. По мірі зменшення робочої довжини хвилі зростає густина струму в резистивному підшарі (хромі), збільшуючи дисипативні втрати мікросмжкової лінії (МСЛ). Добрі результати дає використання алюмінію, який не вимагає підшару: добротність збільшується на 36%. Однак, застосування алюмінію в якості провідника і контактних площинок потребує додаткового нанесення нікелевого покриття для забезпечення монтажу навісних елементів і радіочастотних з'єднувачів. Певні перспективи відкриває застосування в якості адгезійного підшару срібновмісних паст, наприклад, металоорганічних паст або фотополімерної.

Однак, для МОС-паст за один технологічний цикл нанесення-впалення отримується відносно тонкий шар паст. Для зменшення втрат НВЧ сигналу

потрібно зменшити його опір, а для цього наносять не один, а декілька шарів (рис 3.1). Це призводить до збільшення витрат дорогоцінних металів і ускладнює технологічний процес. Відомо, що найбільша густина НВЧ струму спостерігається в тій частині мікросмужкової лінії епюра розподілу густини поверхневого струму по всьому її периметру показана на рис. 4.2. Тобто, добру провідність повинна мати частина провідника, яка контактує з поверхнею

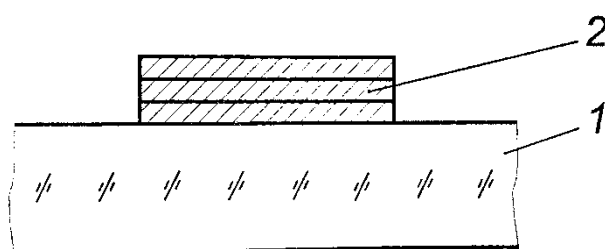


Рисунок 4.1 – Багатошаровий провідниковий елемент 2 на підкладці 1

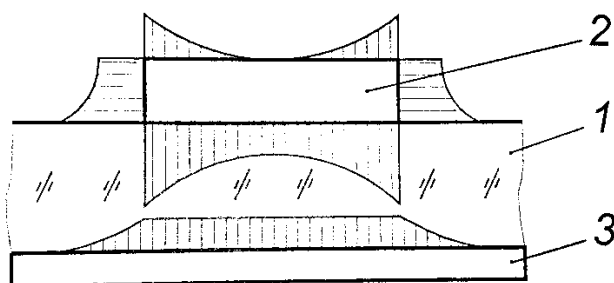


Рисунок 4.2 – Епюра розподілу НВЧ струму по периметру провідника (1 – підкладка, 2 – МСЛ, 3 – екран)

підкладки. Для забезпечення цієї умови нижню частину МСЛ виготовляють із одноразово нанесеної срібновмісної, наприклад, металоорганічної або фотоплімерної пасти, а верхню – із гальванічно нарощеного шару міді.

Рисунок схеми отримують методом фотолітографії. Однак, фотолітографія, наприклад, ц відомому технологічному процесі, за порядком йде після нанесення шару міді, а це, в свою чергу, призводить до її витрат.

Результати дослідження розробленого способу виготовлення контактних площадок плат.

Нами запропонований і досліджений комбінований спосіб виготовлення провідникових елементів НВЧ плати, в тому числі контактних площадок, в якому нижня частина контактної площадки для забезпечення високої її електропровідності є із шару металоорганічної або фотополімерної срібної пасти, а верхня – із гальванічно нарощеного шару міді (рис. 4.3). Причому, з

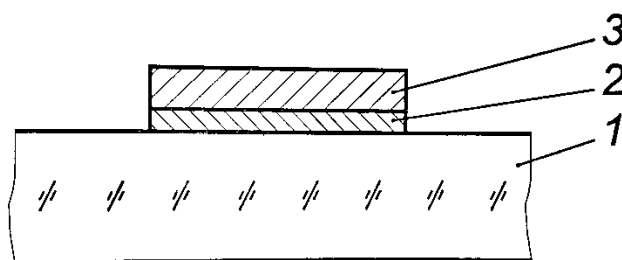


Рисунок 4.3 – Провідниковий елемент, виготовлений комбінованим способом: 1 – підкладка, 2 – срібна частина провідника, 3 – мідна частина провідника

метою зменшення витрат міді перед її гальванічним нарощуванням проводять процес фотолітографії і далі травлення ведуть тільки срібного шару пасти, селективно, в травнику, який має спеціальний склад, мас. %:

вода	79,0
червона кров'яна сіль	
$K_3[Fe(CN)_6]$	7,9
сульфат натрію	
Na_2SO_4	1,0
тіосульфат натрію	
$Na_2S_2O_3$	11,9

біхромат амонію

$(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

0,2

Застосування запропонованого розчину для травлення срібних покриттів із металоорганічної пасти 4783 дало добрі результати. Подібні розчини, але без біхромату амонію, застосовують в фотографії при обробці фотоматеріалів. Біхромат амонію використано в травильному розчині як пасиватор мідної поверхні.

Пропонований комбінований спосіб складається із наступних основних технологічних операцій:

- процес формування суцільного срібного шару на підкладці, що включає нанесення провідникової пасти на основі срібла і її термообробку;
- проведення фотолітографії;
- гальванічне нарощення мідного шару у вікна маски;
- травлення срібного шару в запропонованому травнику.

Суцільний срібний шар формують за типовою технологією методом нанесення через сіткотрафарет на діелектричну підкладку металоорганічної срібної пасти з наступним випалюванням в електричній конвеєрній печі при температурі 830°C. Конвеєрну піч можна використовувати будь-якого типу, але яка забезпечує вказану температуру і має не менше п'яти зон випалювання (наприклад, СК-10/19 або СК-11/16).

Після цього на нанесений і випалений суцільний срібний шар, який попередньо знежирювали бензином, методом центрифугування наносили фоторезист. Фотолітографію проводили із застосуванням позитивного фоторезисту ФП-383. Підкладку із нанесеним фоторезистом сушили при температурі $90 \pm 5^\circ\text{C}$ впродовж 15 хв. Потім суміщали фотошаблон з відповідним рисунком із підкладкою і проводили експонування. Далі фоторезистивний шар промивали розчином їдкого калію, промивали проточною водою і сушили при 100°C протягом 30 хв.

Гальванічне нарощування мідного шару проводили в гальванічній ванні з розчином мідного купоросу. Для цього готували розчин сірчаноокислої міді: в 1 л дистильованої води розчиняли 250 г сірчаноокислої міді, додавали 60 мл сірчаної кислоти і 0,6 мл блискостворювального додатку. Підкладку із срібним шаром і фоторезистивним рисунком поміщали в гальванічну ванну. Швидкість осадження міді 13 мкм/год. Мідь осаджується в місцях, де відсутній фоторезист, товщиною порядку 10 мкм. Підкладку з нарощеною міддю промивали проточною водою.

Травлення срібного шару включає операції: приготування травильного розчину, травлення, промивання і сушіння шарів на підкладці.

З метою вибору оптимального складу травильного розчину досліджувалися різні кількісні співвідношення його складових частин. Ці співвідношення наведені у табл. 4.1. Покажемо, для прикладу, як готують травильний розчин №1: 20 г (7,9 мас%) червоної кров'яної солі розчиняють в 100 мл (39,5 мас%) дистильованої води. Окремо в 100 мл (39,5 мас%) води розчиняють 2,6 г (1 мас%) сульфат натрію, 30 г (11,9 мас%) тіосульфату і 0,5 г (0,2 мас%) біхромату амонію. Перед травленням обидва розчини змішують.

Час травлення срібного шару із пасти 4783 залежить від його товщини – чим більша товщина шару, тим більша витримка в травильному розчині. Сушку шарів проводять в сушильній шафі або на повітрі.

В таблиці 4.2 подано одержані в процесі дослідження кількісні показники після проведення процесу травлення провідникових елементів для різних складів розчину. Із таблиці видно, що оптимальним з точки зору

Таблиця 4.1 – Склад різних варіантів травильного розчину

Травильний розчин, № п/п	Склад, мас%				
	Вода	$K_3[Fe(CN)_6]$	Na_2SO_4	$Na_2S_2O_3$	$(NH_4)_2Cr_2O_7$

Продовження таблиці 4.1

№1	78,59	8	1,1	12,1	0,21
№2	79	7,9	1	11,9	0,2
№3	78	8	1,6	12,2	0,2
№4	80	7,5	0,9	11,4	0,2
№5	78	8	1,55	12,3	0,15
№6	79,25	8	1,6	11	0,15

забезпечення мінімальної величини підтраву є травильний розчин № 2, який дає 2 мкм підправу на 100 мікронних лініях.

Таблиця 4.2 – Технологічні показники провідникових елементів після травлення

Травильний розчин, № п/п	Величина підтраву в мкм (на 100-мкм лініях)	Кількість нарощеної міді (г)	Кількість стравленої міді з однієї підкладки (г)
№1	3	0,075	-
№2	2	0,077	-
№3	4	0,075	-
№4	2,5	0,076	-
№5	5	0,075	0,005
№6	травлення йде дуже повільно		

Розглянутий комбінований спосіб виготовлення контактних площинок площинок товстоплівкових плат дозволив зменшити витрату матеріалів (зокрема, міді), у ньому не застосовуються агресивні хімічні речовини (зокрема, азотна кислота, яка зазвичай використовується у таких випадках) і покращив якість

травлення за рахунок запропонованого травника. Виготовлена за запропонованим способом контактна площинка, у порівнянні з мідною контактною площинкою з резистивним Ni-Cr-підшаром, володіє високою провідністю за рахунок використання підшару срібної шару із металоорганічної чи фотополімерної пасти та товстого шару гальванічно осадженої міді (товщина до 20 мкм), що в поєднанні з покращеною якістю краю – нерівність краю провідника зменшилася в 1,6-1,7 разів, дає зменшення втрат для НВЧ сигналів.

4.2. Розробка та дослідження низькоомного способу з'єднання виводів з контактними площинками мікроплати

Контактні площинки на основі срібних паст, які використовуються при виготовленні несучих і трасування плат і ГПС, як правило, добре піддаються процесам лудіння і паяння. З іншого боку, контактні площинки навісних напівпровідникових кристалів, які встановлюються на несучі і трасувальні плати ГПС, найчастіше виготовляються з алюмінію, який на повітрі покривається щільно. Окисною плівкою. Ця окисна плівка перешкоджає процесу з'єднання за допомогою паяльних припоїв виводів з контактними площинками. Існують різні методи паяння алюмінію. Для усунення окисної плівки і виконання паяльного з'єднання виводів з алюмінієвими контактними площинками був розроблений і запатентований новий спосіб паяння алюмінію і його сплавів.

Спосіб паяння алюмінію та його сплавів, при якому на паяльні поверхні деталей наносять проміжне легкоплавке покриття шляхом оброблювання в двошаровій ванні із рідиновидних припою і флюсу, збирають деталі з розміщенням біля паємких зазорів припою і нагрівають до температури паяння, який відрізняється тим, що з метою підвищення продуктивності процесу і зниження його енергомісткості, двошарову ванну утворюють із олово-вісмут-кадмій-свинцевого сплаву і розчину їдкого натру.

На рис. 4.4 зображена схема нанесення на алюмінієві контактні площинки мікроплати легкоплавкого покриття. Мікроплату 1 оброблюють в двошаровій ванні 2, нижній шар 3 якої складається із олово-вісмут-кадмій-свинцевого сплаву, а верхній 4 – із розчину лугу NaOH. Ванна 2 нагрівається вище температури плавлення шару 3 припою. Спочатку плата 1 проходить шар 4 розчину лугу, в якому з паяємих поверхонь стравлюється окисна плівка, а потім попадає шар 3 розплавленого припою, де відбувається лудіння. Оптимальна температура обробки у ванні 67-70°C. Контроль температури здійснювали звичайним термометром.

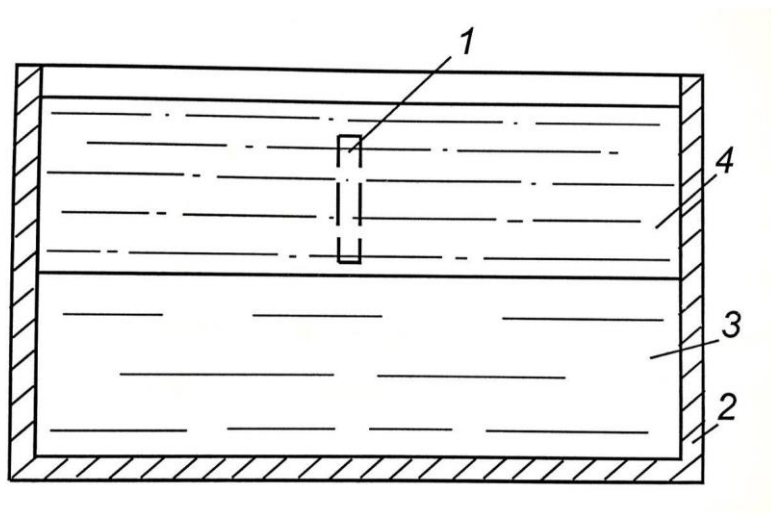


Рисунок 4.4 – Двошарова ванна для нанесення проміжного легкоплавкого покриття на контактні площинки мікроплати (1 – мікроплата, 2 – ванна, 3 – розплав легкоплавкого припою, 4 – розчин лугу NaOH)

Після витягування плати із двошарової ванни їх збирають із розміщенням на контактних площинках припою чи припійних виводів і здійснюють нагрівання до температури паяння цим припоєм. Легкоплавке покриття із сплаву олово-вісмут-кадмій-свинцевого сплаву забезпечує очищення поверхні від окисної плівки і знижує енергомісткість процесу, а проведення операції травлення і нанесення

легкоплавкого покриття в одній ванні з двошаровим розміщенням лугу і сплаву дозволяє підвищити його продуктивність.

Виготовлені способом паяння з'єднання мають менший електричний опір ніж традиційні Au-Al зварні МКЗ. Використання запропонованого способу паяння для виготовлення МКЗ дає підвищення його електропровідності приблизно в 3-5 разів порівняно з термокомпресійними золото-алюмінієвими та золото-срібними і пасти 3713 зварними з'єднаннями і забезпечує опір з'єднання менше 20 мОм.

4.3. Конструктивні методи зменшення опору дротяного МКЗ на основі дослідження впливу на опір геометричних розмірів конструктивних елементів і провідності умовного перехідного шару

Вище було розглянуто моделі опору накладного мікроконтактного з'єднання дроту і плівкового провідника, які пов'язують його з геометричними розмірами та провідністю перехідного шару. Вони дозволяють кількісно дослідити опір МКЗ в залежності від його геометричних розмірів та перехідного контактного опору і визначити числові показники цієї залежності, а отже визначити напрямок підвищення провідності МКЗ.

Запропоновано математичні залежності для визначення опору дротяного МКЗ для двох варіантів проходження струму. Зокрема, для першого випадку (рис.3.1, а) опір МКЗ запропоновано розрахувати за формулою (3.6), а другого випадку – за іншою формулою (3.7). У формули (3.6) і (3.7) входять складники $r_1 = \rho_1 / Bh$, $r_2 = \rho_2 / bt$, $y = B / \rho_n$, із яких видно, що опір МКЗ залежить від його геометричних розмірів: товщини деформованої частини дроту h , товщини плівкового провідника t , ширини плівкового провідника b , ширини деформованої частини дроту B і провідності умовного перехідного шару y . Нижче подано результати дослідження різних варіантів цієї залежності з використанням машинних програмних засобів.

Термокомпресійні з'єднання *Аи*-дроту і плівкового провідника із срібної пасти 3713 виконувалися на установці ЭМ-439М за типовим режимом зварювання ($t = 0,5$ с, $t^{\circ}_{\text{підк}} = 320^{\circ}\text{C}$). Поверхня плівкового провідника перед виконанням контактування підлягала обробці полірувальними кругами із застосуванням алмазної пасти АСМ2/1. Опори термокомпресійних контактних з'єднань вимірювалися за допомогою способу, описаного вище. За результатами проведених вимірювань була розрахована величина питомого перехідного контактного опору: $3,97 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Це значення використане в подальших розрахунках.

Для встановлення залежності опору МКЗ від геометричних розмірів на основі формул (3.6) і (3.7) були розроблені програми розрахунку на мові Паскаль та паралельно в оболонці MathCad. Паралельне програмування застосовано для виключення випадкових помилок при великому масиві обчислень.

Вихідними даними для програмного розрахунку були:

- 1) діапазон зміни діаметру дроту 2...200 мкм;
- 2) діапазон зміни товщини плівкового провідника 0,1...8 мкм;
- 3) діапазон зміни ширини плівкового провідника 80...1000 мкм;
- 4) величина питомого перехідного опору $3,97 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Результати проведених досліджень подано у вигляді графіків на рис. 4.5...4.10.

На рисунку 4.5. наведено залежність опору двох варіантів МКЗ в залежності від ширини плівкового провідника. Виявлено слабку залежність опору МКЗ від ширини плівкового провідника для товщини 1 і 8 мкм., а також для товщини 0.1 мкм при великих ширинах. Це підтверджує доцільність використання формули $r_2 = \rho_2 / bt$.

На рис. 4.6. продано залежність опору МКЗ від товщини плівкового провідника. Для більшості товщин опір також слабо залежить від товщини плівки. Тільки при дуже малих товщинах спостерігається зростання цієї залежності.

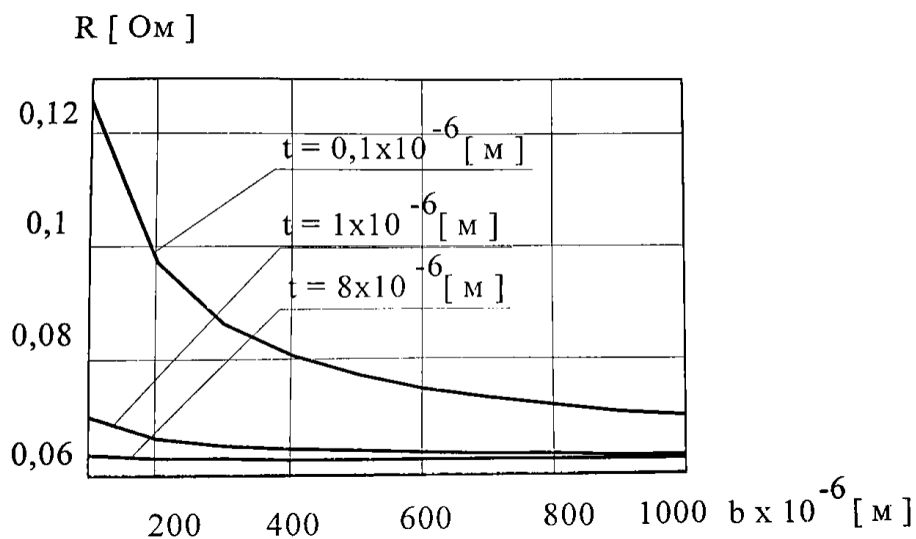


Рисунок 4.5 – Залежність опору МКЗ від ширини плівкового провідника

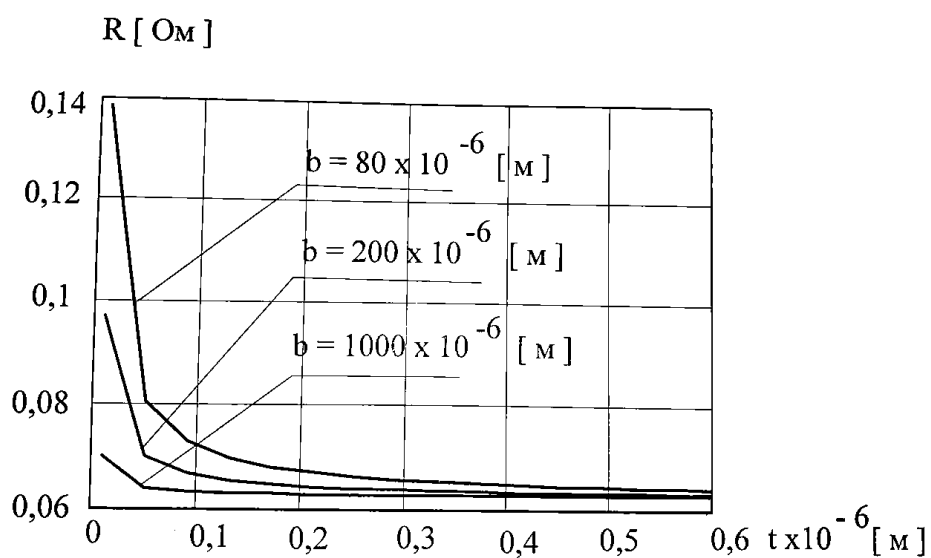


Рисунок 4.6 – Залежність опору МКЗ від товщини плівкового провідника

На рис. 4.7 і 4.8 наведено залежність опору МКЗ від його розміру – ширини B деформованої частини дроту. В проведених розрахунках прийнято $B = l = 2d$ (l – довжина деформованої частини дроту). Із зменшенням діаметру дроту d , і отже і

його деформованої частини, опір МКЗ зростає. Це пояснюється зменшенням площі контакту та його геометричних розмірів. Зростання носить гіперболічний характер. Діаметр використовуваного при монтажі дроту перебуває, переважно, і межах 10...200 мкм. При малих діаметрах електричний опір дуже зростає (рис. 4.7).

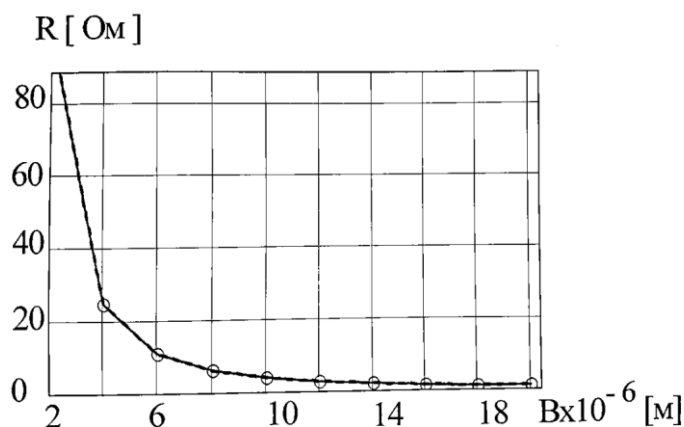


Рисунок 4.7 – Залежність опору МКЗ від ширини деформованої частини дроту (при малих значеннях діаметру дроту)

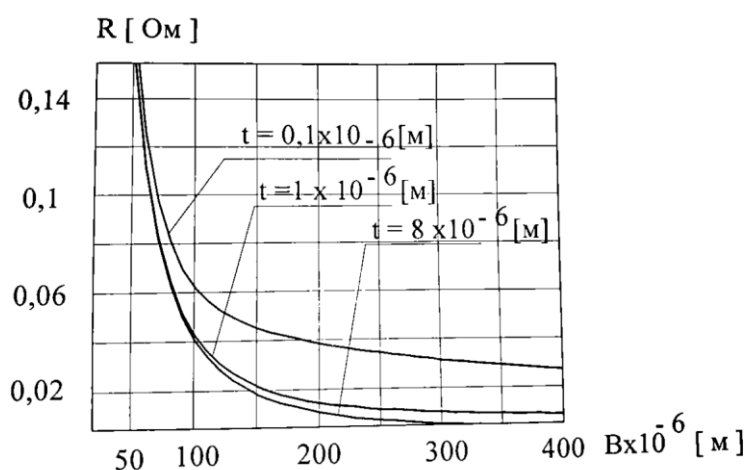


Рисунок 4.8 – Залежність опору МКЗ від ширини деформованої частини дроту (при великих значеннях діаметру дроту)

На рис. 4.9 показана залежність співвідношення P між опорами МКЗ від ширини деформованої частини дроту для двох варіантів проходження струму. Як

видно із графіків, розходження в розрахунку за формулами (3.6) і (3.7) незначне, в межах 0...3% (причому, для більшості випадків $< 1\%$). Тому, на практиці варто використовувати формулу (3.7) для визначення опору дрітяного МКЗ, як більш зручну для розрахунків.

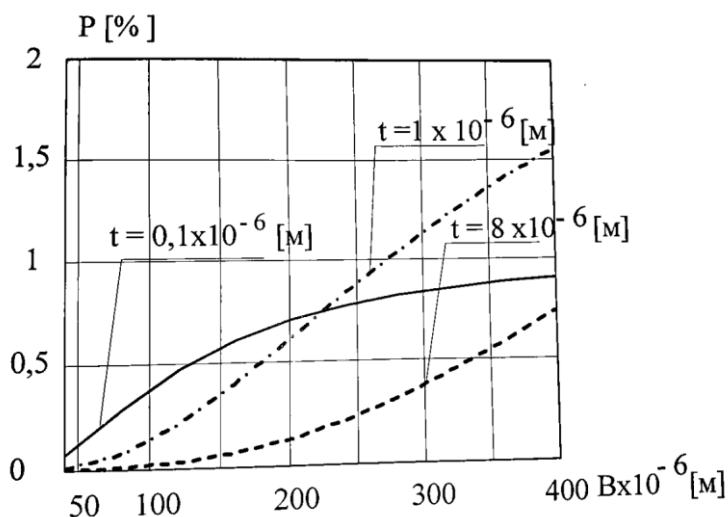


Рисунок 4.9 – Залежність процентного співвідношення P між величинами опору МКЗ для двох варіантів проходження струму від ширини деформованої частини дроту

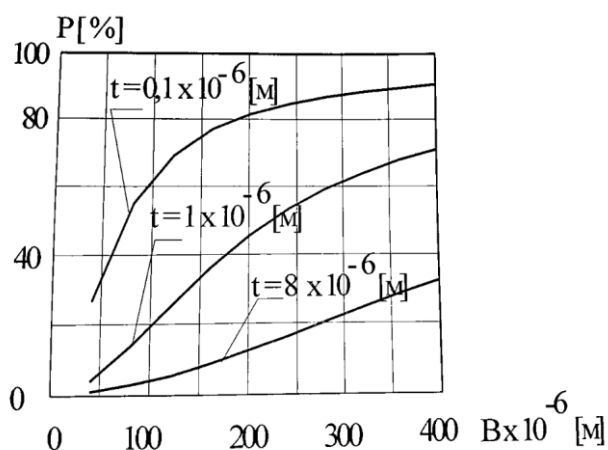


Рисунок 4.10 – Залежність процентного співвідношення між опором МКЗ і перехідним контактним опором від ширини деформованої частини дроту

На рис. 4.10 показано відсоткове співвідношення між опором МКЗ та перехідним контактним опором. Перехідний контактний опір розраховується за формулою.

Із графіків видно, що для розмірів деформованої частини дроту менших 100 мкм (відповідно, діаметрів дроту менших 50 мкм) при товщинах плівкового провідника 1 і 8 мкм, і менших 60 мкм при товщині плівкового провідника 0,1 мкм, опір, в основному, визначається перехідним контактним опором. Вплив опорів контактної площинки та деформованої частини дроту при зростанні їхніх геометричних розмірів в діапазоні від 40 до 400 мкм також зростає. Але сам опір МКЗ при цьому значно зменшується, бо збільшується площа контакту. Тому, зауважений вплив не відіграє суттєвої ролі. Проведене дослідження показало слабу залежність опору МКЗ від ширини і товщини для типових розмірів контактної площинки (тільки при дуже малих їх значеннях ця залежність є значимою). Отже, при оптимальному режимі зварювання термокомпресійним способом ($t = 0,5$ с, $t^{\circ}_{\text{підк}} = 320^{\circ}\text{C}$) для звичайних розмірів контактної площинки підвищення електропровідності МКЗ досягається збільшенням розмірів перехідної зони. Величина цього збільшення обмежується допустимими максимальними розмірами контактної площинки, тобто площею яку вона може займати на поверхні кристалу. Оптимальне співвідношення опору МКЗ і розмірів контактної площинки визначається в кожному конкретному випадку конструктором.

4.4. Визначення напрямків зменшення опору жорстких стовпчикових мікроконтактних з'єднань ІС на основі дослідження різних конструктивно-технологічних варіантів з'єднання

Опір жорстких (стовпчикових) мікроконтактних з'єднань ІС також залежать від конструктивних розмірів. Розміри стовпчикових виводів бувають різні – від десятків до декількох сотень мікрометрів. У наведені розміри золотого стовпчикового виводу: висота $h = 0,2$ мм і площа поперечного січення $F = 1,13 \cdot 10^{-4}$

$^2 \text{ мм}^2$. На практиці зустрічаються також менші висоти стовпчикових виводів. В дослідженні приймемо $h = 0,1 \text{ мм}$ і $F = 1 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$. Будемо вважати, що товщина зон взаємопроникнення матеріалу виводу і плівкових провідників значно менше товщини самих провідників.

Для визначення числових показників впливу конструктивних складових ЖМКЗ на його опір зробимо, згідно показаної на рис. 3.4 моделі і формули (3.6), (3.8), (3.9), (3.11)...(3.21), розрахунок складових формули (3.10) для сформованого гальванічним методом золотого стовпчикового виводу на алюмінієвій (з проміжним нікелево-золоти шаром) контактній площині напівпровідникового кристалу і його твердофазного зварного з'єднання з контактною площинкою підкладки ГІС. Оскільки контактна площадка кристалу тришарова (Al-Ni-Au), то враховуючи пропорційне співвідношення товщин шарів (0,6:0,35:0,05), визначимо приведені питомі опори за формулами (3.16), (3.17): $\rho_{nc1} = 0,043 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, $\rho_{np1} = 0,035 \text{ маОм} \cdot \text{м}$. Умовне середнє значення приведенного питомого опору буде дорівнювати $0,039 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Із-за малого розходження між паралельним і умовним середнім значенням приведенного питомого опору в розрахунку можна використовувати одне із цих значень.

Розрахунок здійснюємо для двох матеріалів контактної площинки ГІС – алюмінію і пасти 3713 (поверхневий опір $0,003 \dots 0,005 \text{ Ом}$). Питомий перехідний контактний опір ρ_n зварного з'єднання Al-контактної площинки із полірованої пасти 3713 і Au-дроту, згідно наших досліджень, дорівнює $3,97 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Ці значення використаємо при розрахунку опорів перехідних зон золотого стовпчикового виводу і контактних площинок із алюмінію і пасти 3713. Оскільки згідно прийнятих уявлень фізичні основи процесу утворення з'єднання і елементарні акти взаємодії на межі розділу зварюваних матеріалів є загальні для всіх видів твердофазного зварювання (ультразвукового, дифузійного, тертям та ін.), то ці ж значення при необхідності, можна з певним наближенням прийняти і для інших способів твердофазного з'єднання.

У зварному контакті перехідна зона 3 складається із множини дискретних острівків схоплювання. Опір перехідної зони для зварного МКЗ, який дорівнює перехідному контактному опору $R_{кп}$, визначається за формулою і для золотого стовпчикового виводу з контактною площиною із пасти 3713 він склав $3,97 \cdot 10^{-2}$ Ом, а з алюмінієвою контактною площиною – $7,60 \cdot 10^{-2}$ Ом.

Перехідний опір гальванічно осадженого стовпчикового виводу взаємно наступним чином. Перехідний опір гальванічного покриття золотом, який виміряний за тестовою схемою з двома металічними циліндрами, що поперечно перетинаються, має величину порядку $0,0015 \dots 0,0020$ Ом. При цьому радіус точкової контактної поверхні циліндрів обчислюється за формулою Герца і у разі чисто пружної деформації знаходиться у межах $0,1 \dots 0,01$ мм. Якщо матеріал основи гальванічного покриття мідь, то для двох мідних провідників, що перетинаються, діаметром 1 мм при навантаженні 0,1 кг розрахований нами радіус точкової контактної поверхні склав $1,77 \cdot 10^{-2}$ мм, що відповідає її площі $9,42 \cdot 10^{-4}$ мм². Для гальванічно осадженого стовпчикового виводу з контактною площиною $1,0 \cdot 10^{-2}$ мм² перехідний опір буде, відповідно, $18,84 \cdot 10^{-5}$ Ом або $\approx 0,2 \cdot 10^{-3}$ Ом, тобто він не значний.

В таблиці 4.3 наведені результати розрахунку складових, що входять у формулу (3.10) для двох випадків зварного ЖМКЗ. Для алюмінієвої контактної площинки ГІС із-за незначної товщини адгезійного підшару приведений питомий опір не визначається, а в розрахунку враховувалися питомий опір алюмінію.

Як видно із таблиці 4.3, у разі з'єднання твердофазною зваркою різнорідних матеріалів, найбільший вплив на опір ЖМКЗ виявляє опір перехідної зварної зони між стовпчиком-виводом і контактною площиною ГІС. Опір же самого золотого стовпчика-виводу є порівняно незначним, тому, деякі зміни форми виводу по висоті, що зустрічаються на практиці, будуть мало впливати на загальний опір ЖМКЗ.

Отримані значення опору ЖМКЗ є одного порядку з опором зварного мікродротяного виводу. Його відносно значні величини пояснюється малою ефективною площею контактування стовпчика-виводу і контактної площинки ГІС в зварному з'єднанні.

Зварні установки мають різні точності суміщення зварного наконечника з контактною площиною, тому мінімальні її розміри можуть бути різними. Тому доцільним є дослідження опору контактних площинок від її розмірів у складі ЖМКЗ. На рис. 4.7 і рис. 4.8 показані розраховані за формулами (3.12), (3.14) і (3.31) залежності зміни опору контактної площинки із пасти 3713 і Al-контактної площинки від її розміру для золотого стовпчиккового виводу з поперечним січенням 0,1х0,1 мм. Межі зміни розмірів квадратної контактної площинки – від 0,1 мм до 0,2 мм. Для визначення опору підвивідної частини контактної площинки за формулами (3.6), (3.8), (3.9), (3.13)...(3.15) застосовувалося програмування на мові Паскаль.

Таблиця 4.3 – Значення опору конструктивних елементів двох варіантів зварних ЖМКЗ

Складові опору зварного ЖМКЗ	Алюмінієва контактна площинка ГІС	Доля в загальному опорі, %	Контактна площинка ГІС із пасти 3713	Доля в загальному опорі, %	Примітка
Опір контактної площинки 2, МОм	11,6	11,1	3,1	5,2	Ширина площинки 0,2

Продовження таблиці 4.3

Опір перехідної зони 3, МОм	76,0	72,9	39,7	66,9	
Опір золотого стовпчика- виводу 4, МОм	0,2	0,2	0,2	0,3	Ширина виводу 0,1 мм
Опір перехідної зони 5, МОм	0,2	0,2	0,2	0,3	
Опір Al- Ni-Au- контактної площинки 6, МОм	16,2	15,6	16,2	27,3	Ширина площинки 0,2 мм
Сумарний опір золотого ЖМКЗ, МОм	104,2	100	59,4	100	

Як видно із рис. 4.11 при збільшенні розмірів контактної площинки із пасти 3713 складова $R_{кл1}$, що визначається підвividною її частиною навпаки, зменшується. При цьому сумарний опір контактної площинки (крива 3) збільшується.

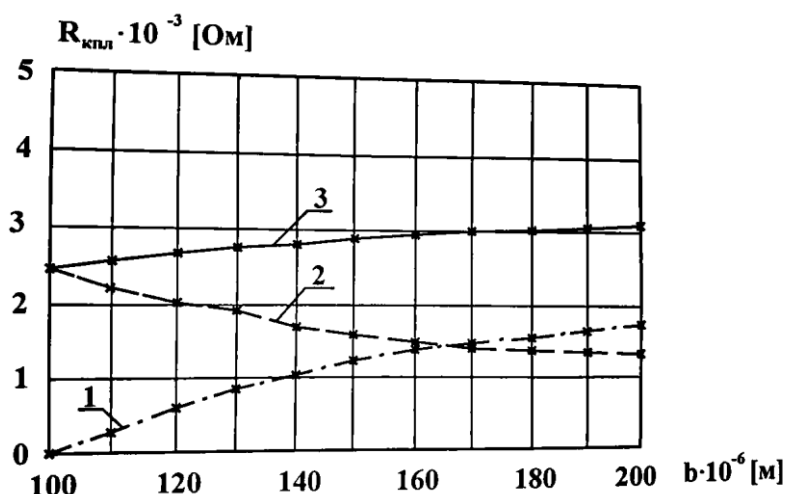


Рисунок 4.11 – Залежність опору контактної площинки із пасти 3713 від її розміру при товщині 8 мкм (1 – зміна опору R_{kpl1} передвивідної частини контактної площинки довжиною a , 2 – зміна опору R_{kpl2} підвивідної частини контактної площинки довжиною l , 3 – зміна сумарного опору контактної площинки $R_{kpl} = R_{kpl1} + R_{kpl2}$)

Сумарний опір Al-контактної площинки (рис. 4.12) також збільшується при збільшенні її розмірів. Однак, в обох випадках із збільшенням розмірів контактної площинки ці зміни опору зменшуються.

Визначимо опір для інших варіантів з'єднання стовпчикowego виводу з контактною площиною. Відомо, що для припійного з'єднання оптимальний по надійності розмір (товщина) перехідної зони знаходиться в межах $t = 0,1 \dots 1$ мкм. Фізична структура перехідної зони може бути впорядкованою і неупорядкованою і ці два випадки зустрічаються в реальних контактах. Опір упорядкованої структури є більшим, ніж неупорядкованої. Для оцінки опору приймемо гірший випадок, тобто будемо вважати структуру неупорядкованою. Оскільки в сучасних розробках напівпровідникових і гібридних інтегральних схем широко використовуються алюмінієва і мідна металізація, будемо вважати, що контактні площинки кристалу виготовлені із алюмінію з нікелево-золотим покриттям (рис. 3.3), а контактні площинки підкладки ГІС зроблені із міді з тонким золотим захисним покриттям.

Відомо, що наприклад, для неупорядкованого бінарного сплаву Au-Gu його питомий опір в 6...7 раз більший за аналогічний параметр самих складових. Такий коефіцієнт і приймемо в розрахунку. Питомий опір м'яких припоїв на порядок більший ніж питомий опір міді. Для припою ПОС-40 питомий опір складає 0,16 мкОм*м. З врахуванням прийнятого коефіцієнта питомий опір перехідних зон 3 і 5 (рис. 3.4) складе 0,96...1,12 мкОм*м (в розрахунку візьмемо 1,12 мкОм*м). Опір перехідної зони товщиною (0,1...0,2) мкм, розрахований за формулою (3.19), буде: $R_{nз1} = 0,0003...0,0006 \cdot 10^{-2}$ Ом і, хоч розташований він по максимуму питомого опору, є незначним (в подальшому розрахунку візьмемо $0,0006 \cdot 10^{-2}$ Ом).

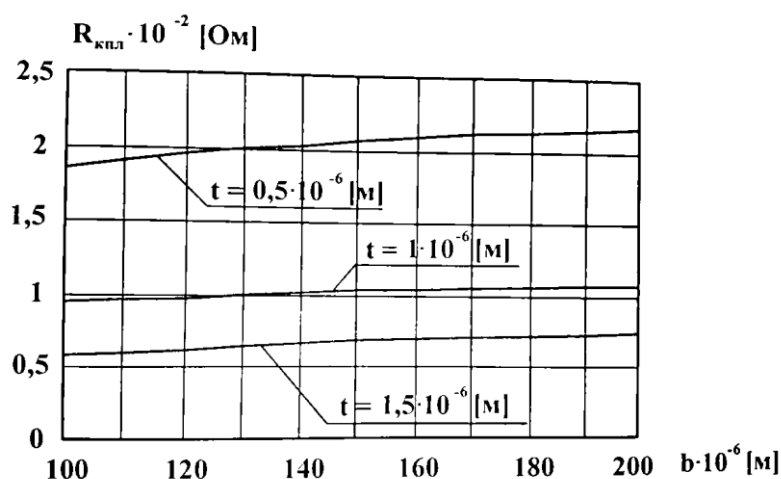


Рисунок 4.12 – Залежність сумарного опору $R_{кпл} = R_{кп1} + R_{кп2}$ квадратної Al-контактної площинки від її розміру при різних її товщинах

При визначенні опору контактної площинки припійного виводу її розміри приймемо такими ж, як і для попереднього золотого виводу – 0,2х0,2 мм (для порівняння результатів). Якщо площа контактування контактної площинки з деформованою частиною мікродроту 0,2х0,2 мм, то визначений за формулами (3.13)...(3.15) опір підвивідної частини алюмінієвої контактної площинки для цього розміру складе $R_{кнAl} = 0,90 \cdot 10^{-2}$ Ом. Оскільки для припійного стовпчика контактну площинку кристалу використовуємо тришарову (Al-Ni-Au), то її опір

визначимо із перерахунку опору алюмінієвої контактної площинки, враховуючи коефіцієнти співвідношення k_c питомих опорів – вищевизначеного приведенного та алюмінію: $R_{кп3} = R_{кпAl} * k_c = 0,90 * 10^{-2} \text{ Ом} * 0,039 / 0,028 = 1,25 * 10^{-2} \text{ Ом}$. Оскільки припійний вивід повністю заповнює контактну площинку, то складова опору $R_{кп1}$ (рис. 3.5) в даному випадку відсутня і опір контактної площинки повністю визначається складовою $R_{кп2}$, яка в даному випадку дорівнює $R_{кп3}$.

Опір мідної контактної площинки також визначимо із перерахунку опору алюмінієвої контактної площинки. Коефіцієнт співвідношення питомих опорів міді в алюмінію дорівнює $k_c = 0,018 / 0,028 = 0,64$. Тоді: $R_{кпGu} = R_{кпAl} * k_c = 0,58 * 10^{-2} \text{ Ом}$ (приведений питомий опір в цьому випадку не визначався, тому що вплив тонких адгезійного підшару товщиною $50 * 10^{-10} \text{ м}$ і захисного золотого шару товщиною $50 * 10^{-9} \text{ м}$ на опір мідного шару, буде незначним). На рис. 4.13 вказана залежність опору квадратних Al-Ni-Au (крива 3) і мідної (крива 2) контактних площинок від розміру при умові її повного покриття (заповнення) виводом. Як видно із графіка, опір квадратної контактної площинки, у цьому разі, мало залежить від її розміру (незначно зменшується при збільшенні ширини).

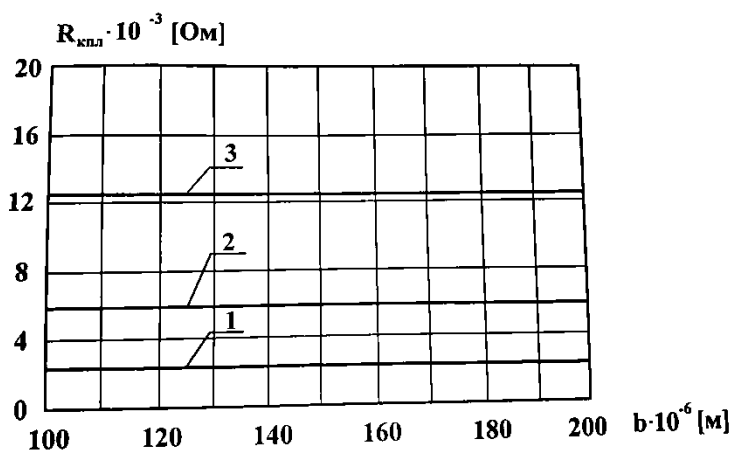


Рисунок 4.13 – Залежність опору квадратних контактних площинок із провідникової срібної пасти 3713 (1, товщина 8 мкм), міді (2, товщина 1 мкм) і Al-Ni-Au (3, сумарна товщина 1 мкм) від їх розміру при їх повному покритті виводом

При визначенні опору стовпчикового виводу співвідношення висоти і ширини припійного стовпчика-виводу – 5/6. Тоді опір припійного стовпчика висотою $h = 0,16$ мм і площею поперечного січення $F = 4 \cdot 10^{-2}$ мм² (припій повністю заповнить контактну площадку), визначений за формулою, буде дорівнювати: $R_{\theta} = 0,064 \cdot 10^{-2}$ Ом.

Сумарний опір припійного ЖМКЗ, згідно формули (3.10), складе $R_{\text{ксс}} = 19,0$ мОм. Згідно літературних даних, перехідний опір пайки виводів методом оплавлення знаходиться в межах до 10 мОм. Як показує розрахунок, таке значення опору можу стосуватися тільки до сумарного опору перехідних елементів ЖМКЗ (перехідних зон і припійного стовпчика). З врахуванням опору контактних площадок загальний опір ЖМКЗ значно збільшується. Результати розрахунку опору припійного ЖМКЗ зведені в таблицю 4.4.

Із таблиці 4.4 видно, що найбільший вклад в загальний опір припійного ЖМКЗ вносять контактні площадки. Опір перехідних зон між припійним виводом і контактними площадками, хоч і розраховані по максимуму, незначні. Опір мідної контактної площадки є меншим, ніж опір алюмінієво-нікелево-золотої контактної площадки що і зрозуміло – бо мідь володіє малим питомим опором. Для зменшення опору припійного ЖМКЗ при виготовленні контактних площадок необхідно застосовувати провідникові матеріали з можливо меншим питомим опором.

Визначимо опір клейового ЖМКЗ. При використанні клейового з'єднання стовпчикові виводи на поверхні кристалу формують з допомогою термокомпресії і ультразвуку і гальванічним методом. Розрахуємо опір ЖМКЗ для сформованого гальванічним методом золотого стовпчикового виводу на алюмінієвій контактній площинці (з проміжним нікелевим і захисним золотим шаром) кристалу і його клейового з'єднання з контактною площадкою із пасти 3713 підкладки ГІС.

Таблиця 4.4 – Значення опору конструктивних елементів припійного ЖМКЗ

Складові опору паяного ЖМКЗ	Значення опору, мОм	Доля в загальному опорі, %	Примітка
Опір контактної площинки 2	5,8	30,60	Ширина площинки 0,2 мм
Опір перехідної зони 3	0,006	0,03	
Опір припійного стовпчика-виводу 4	0,64	3,38	
Опір перехідної зони 5	0,006	0,03	
Опір контактної площинки 6	12,5	65,96	Ширина площинки 0,2 мм
Сумарний опір припійного ЖМКЗ	18,95	100	

Значення опорів золотого стовпчика-виводу і контактних площинок візьмемо із попереднього випадку (таблиця 4.3). Врахуємо, що перехідну зону 3 (рис. 3.4) в цьому випадку замінить прошарок клею між контактною площиною підкладки і виводом. Для монтажних операцій в мікроелектроніці застосовуються клеї-контактоли марок УП-16-09, УП-16-09с, УП-16-09г, УП-16-13, наповнені графітом, нікелевим порошком або сріблом з питомим електричним опором від $5 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ Ом*м. Відомий також клей-контактол УП5-201 для посадки кристалів ВІС, який має питомий електричний опір $5 \cdot 10^{-6}$ Ом*м. Оптимальною вважається товщина клейового шару 60...120 мкм. Клеї малоефективні в зазорах менше 5 мкм, а збільшення товщини клейового шару більше 250 мкм може призвести до

реалізації тільки половини можливої міцності. Монтаж кристалів з жорсткими выводами здійснюється також з допомогою анізотропного провідного клею, який представляє собою суміш провідних частинок і термореактивного клею. Клей заповнює весь простір між кристалом і підкладкою ГПС і забезпечує як механічне так і електричне їх з'єднання. Клей в цьому випадку виконує функцію так званого недоливку, зменшуючи вплив механічних напружень, які виникають при зміні температури внаслідок різниці коефіцієнтів лінійного розширення кристалу і підкладки.

Розрахуємо опір клейового прошарку товщиною 60 мкм з питомим опором $5 \cdot 10^{-6}$ Ом*м для поперечного січення стовпчикового виводу $F = 1,0 \cdot 10^{-2}$ мм² за формуло (3.20): $R_{kc} = 0,03$ Ом. Тоді опір всього клейового ЖМКЗ згідно формули (3.10) буде дорівнювати: $R_{кcv1} = 4,97 \cdot 10^{-2}$ Ом = 49,7 мОм (в даному розрахунку прийнято, що шар струмопровідного клею знаходиться між виводом і контактною площиною, реально же він буде присутнім і на сусідніх місцях площинки і виводу і тому зменшувати їх опір). Очевидно, що товщина клейового шару 60 мкм для стовпчикових виводів, які мають приблизно такі ж розміри, не у всіх випадках є раціональною. Оскільки клей є ще відносно ефективним до товщини 5 мкм, розрахуємо опір для цього значення його товщини: $R_{кcv1} = 0,25 \cdot 10^{-2}$ Ом. Опір клейового ЖМКЗ згідно формули (3.10) з врахуванням того, що замість опору перехідної зони 1, підставляємо опір клейового прошарку, буде дорівнювати: $R_{кcv2} = 2,22 \cdot 10^{-2}$ Ом = 22,2 мОм. Згідно літературних даних, перехідний опір склейки виводів електропровідним клеєм знаходиться в межах до 25 мОм. Результати розрахунку зведені в таблицю 4.5.

Із таблиці 4.5 видно, що найбільший вклад в загальний опір клейового ЖМКЗ вносять контактні площинки і клейовий шар. Чим більша товщина клейового прошарку, тим більший вклад в загальний опір він вносить.

Для зменшення опору клейового ЖМКЗ необхідно, по можливості, зменшувати розмір контактної площинки в напрямку протікання струму ібо

збільшувати її товщину, застосовувати клеї з можливо меншим питомим опором, а також зменшувати товщину клейового прошарку.

Таблиця 4.5 – Значення опору конструктивних елементів клейового ЖМКЗ

Складові опори клейового ЖМКЗ	Величина опору, мОм	Доля в загальному опорі, %	Примітка
Опір контактної площинки 2	3,1	6,2...14,0	Ширина площинки 0,2 мм
Опір клейового шару (замість зони 3)	2,5...30,0	11,2...60,4	
Опір золотого стовпчика- виводу 4	0,2	0,4...0,9	
Опір перехідної зони 5	0,2	0,4...0,9	
Опір контактної площинки 6	16,2	32,6...73,0	Ширина площинки 0,2 мм
Сумарний опір клейового ЖМКЗ	22,2...49,7	100	

Основні результати визначення опору зварного, припійного і клейового ЖМКЗ зведені в таблицю 4.6. Відносно більша величина опору для двох наведених в таблиці 4.6 випадків зварних з'єднань пояснюється меншою ефективною площею контактування, ніж для інших способів з'єднання. Із таблиці видно, що розраховані значення опору стовпчикових виводів і дані літературного джерела для випадків припійного оплавлення і приклеювання є одного прорядку. Оскільки методику

розрахунку автори не наводять, то запропонована вище методика розрахунку прийнята для практичного визначення опору ЖМКЗ.

Таблиця 4.6 – Величина опору ЖМКЗ для різних варіантів з'єднання

Спосіб з'єднання	Зварювання			Припійне оплавлення	Приклеювання
	Площинка ГІС із пасти 3713	Al-площинка ГІС	Au-площинка ГІС		
Значення опору ЖМКЗ згідно розрахунку, мОм	59,4	104,2	≤ 10 (оцінка)	18,95	$\leq 22,2 \dots 49,7$
Значення перехідного опору згідно літературних даних, мОм	немає даних		≤ 10	≤ 10	≤ 25

Таким чином підвищення електропровідності стовпчикowego МКЗ з технологічного боку досягається вибором способу з'єднання, а для випадку зварювання – вибором контактних матеріалів.

4.5. Висновки по проробленій роботі

Для підвищення електропровідності конструктивних елементів МКЗ розроблено новий комбінований спосіб виготовлення низькоомних контактних площинок і провідникових елементів товстоплівкових плат, який зменшив шкідливість, покращив якість травлення і електропровідність за рахунок зменшення нерівності краю провідника в 1,6-1,7 разів та застосування нижнього адгезійного високопровідного срібного шару в багатошаровому провіднику замість адгезійного резистивного ніхромового підшару, по якому проходить основна частина високочастотного струму.

Для створення методом паяння контактного з'єднання зовнішніх виводів (Cu, Au, Al) з алюмінієвими контактними площинками розроблена технологія, яка забезпечує опір з'єднання менше 20 мОм шляхом нанесення проміжного легкоплавкого покриття на алюмінієву контактну площинку в нагрітій двошаровій лужно-припійній ванні і подальше здійснення паяння звичайним припоєм.

Проаналізовано залежність опору дротяного МКЗ від його геометричних розмірів. Виявлено, що ця залежність від ширини і товщини плівкового провідника не є значимою, а ось зміна діаметру дроту суттєво впливає на його опір. Виявлено, що електропровідність МКЗ значно підвищується при збільшенні діаметру використовуваного мікродроту. Визначено, що розходження між опорами МКЗ, які визначені за запропонованими формулами для двох основних випадків проходження струму, є незначними – в межах 0...3%. Це дозволяє, в загальному, для оцінки опору МКЗ використовувати вперше запропоновану більш просту формулу (математична модель для другого випадку проходження струму).

Встановлено, що із збільшенням геометричних розмірів конструктивних елементів їхній вплив на опір МКЗ зростає, а вплив перехідного контактного опору зменшується. Для менших же розмірів МКЗ його опір майже повністю визначається перехідним контактним опором і може оцінюватися за запропонованою спрощеною формулою. Тобто для підвищення електропровідності

малорозмірних МКЗ потрібно підвищувати електропровідність перехідної області між дротяним провідником і контактною площинкою.

Вперше визначено складові електричного опору контактної площинки і всього ЖМКЗ з врахуванням нерівномірності розподілу струму. Виявлено суттєвий вплив опору контактних площинок і перехідних зон на загальний опір ЖМКЗ. Визначено, що для твердофазного зварного з'єднання різнорідних матеріалів доля опору перехідної зони в загальному опорі перевищує 70%, а доля сумарного опору контактних площинок для припійного з'єднання досягає 90%. В клейовому шарі ЖМКЗ суттєвий вплив на опір, окрім контактних площинок, здійснює також і клейовий шар.

Запропонована методика визначення опору золотого і припійного стовпчикових виводів для різних способів з'єднання. Величина електричного опору зварного ЖМКЗ для наведених різнорідних поєднань контактних матеріалів визначена вперше. Виявлено, що з'єднання за допомогою припійного оплавлення має менший опір, порівняно із зварними та клеєними з'єднаннями (окрім випадку зварного з'єднання золото-золото). Для отримання високо провідних ЖМКЗ запропоновано використовувати удосконалені способи паяння.

5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

5.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 5.1. – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Методи підвищення електропровідності мікроконтактних з'єднань інтегральних мікросхем	1. Радіо- і електронне приладобудування	Створення надійного електричного зв'язку
	2. Вимірювальна техніка	Створення надійного електричного зв'язку

Таблиця 5.2. – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристик и ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
1.	Економічні	5 у.о.	2,5 у.о.	2 у.о.	2,2 у.о.	-		
2.	Призначення	Підвищення електропровідності і МКЗ	Підвищення електропровідності МКЗ	Підвищення електропровідності МКЗ	Підвищення електропровідності МКЗ			+

Продовження таблиці 5.2

3.	Надійності	Довговічність – 10 років	Довговічність – 12 років	Довговічність – 11 років	Довговічність – 10 років	+		
4.	Технологічні	Зменшення електричного опору МКЗ ІС	Зменшення електричного опору МКЗ ІС	Зменшення електричного опору МКЗ ІС	Зменшення електричного опору МКЗ ІС		+	
5.	Ергономічні	-	-	-	-		+	
6.	Органолептичні	-	-	-	-		+	
7.	Естетичні	-	-	-	-		+	
8.	Транспортувальності	Поставляється у картонній коробці	Поставляється у картонній коробці	Поставляється у картонній коробці	Поставляється у картонній коробці		+	
9.	Екологічності	Екологічно	Екологічно	Екологічно	Екологічно		+	
10.	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	

Конкурент 1: Виробник мікросхем "Intel".

Конкурент 2: Виробник мікросхем "IBM".

Конкурент 3: Виробник мікросхем "Freescale".

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.3. – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Виявлення і дослідження аналітичних залежностей електричного опору МКЗ від їхніх конструктивних параметрів	Процес формування суцільного срібного шару, проведення фотолітографії, гальванічне нарощування мідного шару, травлення срібно шару	Наявна	Доступно
Технологія відома і готова до широкого вжитку.				

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 5.4. – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	5000 ум.од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Розгортання великого виробництва
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	200%

Ринок є привабливим для входження.

Таблиця 5.5. – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Зменшення опору МКЗ і створення надійного електричного зв'язку	Приладобудівні компанії, виробники вимірювальної і обчислювальної техніки, військова та побутова техніки	-	Товар має бути більш енергоефективним

Таблиця 5.6. – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є наукоємким тому потрібні люди з певними навичками	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях

Продовження таблиці 5.6

2.	Потреба в ресурсах	Для створення продукту потрібне технічне забезпечення та певні умови для тестування працездатності	Укладання договорів з поставниками ресурсів та оренда приміщень для виготовлення та тестування продукту
----	--------------------	--	---

Таблиця 5.7. – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Спонукає розробляти і виробляти нові продукти, покращувати метод виробництва	Покращення характеристик товару
2.	Попит	Відслідковується тенденція попиту на даний вид товару, так як ІС все більше удосконалюються	Покращення характеристик товару

Таблиця 5.8. – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
--------------------------------------	---	--

Продовження таблиці 5.8

1. Вказати тип конкуренції поліполія	На ринку присутня велика кількість компаній	Підвищувати якість товару за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованого персоналу
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнародний	Місцезнаходження фірм не обмежується територіально;	Залучати нові інвестиції, вдосконалювати існуючі методи
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.	Слідкувати за продуктами конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращувати якість товару
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Передбачає продаж продукції за більш низькими цінами, ніж конкуренти.	Оптимізувати витрати на виробництво

Продовження таблиці 5.8

6. За інтенсивністю - немарочна	Роль торгової марки незначна	Реклама товару
------------------------------------	---------------------------------	----------------

Таблиця 5.9. – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари- замінники
	“Intel” “IBM” “Freescale”	Немає	Товар продається безпосередньо розробниками	Вимоги до якості і довговічності	Замінники в немає
Висновки:	Інтенсивність досить висока, конкуренти вже давно на ринку	Немає	Постальники не диктують умови роботи на ринку	Товар має бути якісним і довговічним	Обмежен ь немає

Для того, щоб бути конкурентоспроможним на ринку для розробки товару потрібно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі науки та інженерів для покращення якості товару.

Таблиця 5.10. – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Енергоефективність МКЗ	Має найкращі показники серед конкурентів на даний момент

Продовження таблиці 5.10

2.	Якість розробки з точки зору показників якості та довговічності	Продукт має видавати стабільно високий відсоток енергоефективності з плином часу
3.	Наявність наукових ресурсів	Для покращення якості продукції та технологічного шляху потрібні наукові ресурси
4.	Економічний (ціна товару)	Ціна товару не має бути занадто висока, щоб знайти потенційних покупців.

Таблиця 5.11. – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з “Freescale”						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Енергоефективність МКЗ	19	+						
2.	Якість розробки з точки зору показників якості та довговічності	15			+				
3.	Наявність наукових ресурсів	15				+			
4.	Економічний (ціна товару)	12							+

Таблиця 5.12. – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Енергоефективність МКЗ	Слабкі сторони: Економічний (ціна товару)
Можливості: залучення додаткового фінансування буде сприяти більш швидкому вдосконаленню технології;	Загрози: Збільшення собівартості товару за рахунок збільшення вартості ресурсів і компонентів

Таблиця 5.13. – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Пошук компаній збуту, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, налагодження виробництва, вихід на ринок	80 %	2 роки
2.	Пошук інвесторів, пошук компаній збуту, налагодження виробництва, пошук наукових ресурсів, вихід на ринок	60%	3 роки

Обрано альтернативу № 1.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 5.14. – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Великі промислові компанії	Готові	Високий	Висока	Висока

Продовження таблиці 5.14

Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1.
--

Таблиця 5.15. – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	1	За рахунок великих можливостей по об'ємах збуту товарів (портфеля укладених контрактів на постачання) і продуктивності підприємство може добитися менших витрат	Витрати на виробництво	Стратегія лідерства на характеристиках

Обрано стратегію лідерства на характеристиках.

Таблиця 5.16. – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Так	Так, показники довговічності	Виклику лідера

Таблиця 5.17. – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Висока енергоефективність, довговічність	Лідерство на характеристиках	Енергоефективність МКЗ	Оптимальне співвідношення ціна/якість, оптимізоване виробництво, співпраця.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 5.18. – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Покращення енергоефективності МКЗ	Збільшення енергоефективності МКЗ без ускладнення технології	Конкуренти не впливають на ціноутворення нашого продукту

Таблиця 5.19. – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові	
I. Товар за задумом	Методологія підвищення електропровідності МКЗ	
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	Наявність
	Енергоефективний МКЗ, який має кращі показники провідності	Так
	Якість: довговічність 10 років,	
	Пакування: картонна коробка	

Продовження таблиці 5.19

	Марка: "NewMKZ"
III. Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія.
	Після продажу: доставка, сервісне обслуговування.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент	

Таблиця 5.20. – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	-	2 – 2,5 у.о./м ²	1000 у.о. і вище	2,0 – 10 у.о./м ²

Таблиця 5.21. – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Замовлення товару на сайті компанії або на виробництві	Встановлення контакту, інформування, поділ, зберігання, сортування	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо збуває продукцію покупцям або контрагентам

Таблиця 5.22. – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/ п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонуван ня	Завдання рекламного повідомлен ня	Концепція рекламного звернення
	Застосува ння товару для виробницт ва більш ефективни х електропр иладів	Прямі - канал комунікації, коли інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Збільшення енергоефект ивності МКЗ	Поширення знань про підприємст во і характерист ики товару серед можливих компаній- клієнтів. Звернення уваги на показники ефективнос ті.	Звернення засноване на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують конкуренти. Звернення ґрунтується н а тому чи іншому мотиваційному підході, покликаному впливати на споживчі переваги покупців - наприклад, функціональну перевагу, задоволення, імідж, захоплення і альтруїзм.

Висновки:

Даний проект є конкурентоспроможним і має всі шанси стати вагомим гравцем на цьому ринку. На даний момент наші показники ефективності є лідируючими на ринку за рахунок чого ми маємо конкурентну перевагу. Також варто відмітити, що останнім часом великого розвитку та вдосконалення набули саме ІС.Єдиною завадою може слугувати висока ціна у порівнянні із найближчими конкурентами.

ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень аналітичних залежностей електричного опору мікроконтактних з'єднань від конструктивних параметрів, технології їх виготовлення, розробки нових методик розрахунку і випромінювання електричного опору мікроконтактних з'єднань, вдосконалення і розробки нових технологічних процесів їх виготовлення розроблені конструктивно-технологічні методи підвищення електропровідності мікроконтактних з'єднань ІС, які практично реалізовані при проектуванні та виготовленні гібридно-плівкових та напівпровідникових інтегральних мікроелектронних пристроїв.

Розроблено і досліджено фізичну модель електричного опору накладного дротяного мікроконтактного з'єднання. Встановлено, що розходження між опорами МКЗ, які визначені за запропонованими формулами для двох основних випадків проходження струму, є незначними – в межах 0...3%. На основі проведених досліджень здійснена оцінка опору МКЗ і вперше визначено питомий опір для термокомпресійних з'єднань *Аи*-дроту і плівкового провідника зі срібної пасти. Його величина склала $\rho_n = 3,97 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Показано, що на перехідний контактний опір суттєво впливає ширина перехідної зони.

Розроблено конструктивно-технологічні методи підвищення електропровідності зварного накладного мікроконтактного з'єднання мікродроту та плівкового провідника, що забезпечують зменшення його опору, в який враховується зв'язок опору з конструктивними параметрами (шириною і товщиною контактної площинки, шириною деформованої частини дроту, опором перехідної зони) і встановлено, що із збільшенням геометричних розмірів (ширини і товщини контактної площинки, діаметру дроту) їхній вплив на опір МКЗ зростає, а вплив перехідного контактного опору зменшується (так для товщини контактної площинки 8 мкм із пасти 3713 при зростанні ширини перехідної зони від 100 мкм до 400 мкм вплив геометричних розмірів конструктивних елементів з'єднання зростає у декілька разів). Виявлено, що для ширини перехідної зони менше 100 мкм і при товщині контактної площинки більше 1 мкм опір МКЗ, в основному,

визначається перехідним контактним опором, що необхідно врахувати при проектуванні ІС.

Розроблено математичну модель опору жорсткого стовпчикowego МКЗ, яка враховує вплив на нього опорів конструктивних складових (контактних площинок кристалу і підкладки ГІС з нерівномірним розподілом струму, перехідних зон і стовпчика) та технологічних способів з'єднання і встановлен, що при використанні припійного способу з'єднання в порівнянні зі зварним способом опір мікроконтактного з'єднання зменшується приблизно в 4...5 разів. Показово, що при розробці конструктивно-технологічних виконань МКЗ мінімальними повинні бути: для зварних з'єднань – опори перехідних зон, для припійних – опори контактних площинок, для клеєних з'єднань – опори контактних площинок і клейового прошарку, що необхідно враховувати при проектуванні ІС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Матвийкив М. Д. Влияние механических напряжений на качество микроконтактов интегральных схем / М. Д. Матвийкив, Д. Т. Дячок, Е. В. Кулык // Вестник Львовского политехнического института. Сер. Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств.-1984.-№ 186.- С.82-85.
2. Дячок Д. Т. О сопротивлении контактного соединения микропровода и тонкопленочного проводника / Д. Т. Дячок // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники.-1988.-Вып.12.- С.112-115.
3. Дячок Д. Т. Спосіб вимірювання опору контактного з'єднання мікродроту і плівкового провідника / Д. Т. Дячок, В. А. Павлиш, Л. М. Смеркло // Вісник Нац. університету "Львівська політехніка". Сер. Елементи теорії та прилади твердотільної електроніки.-2003. -№ 491.- С.81-86.
4. Дячок Д. Моделі зварних мікроконтактних з'єднань дроту і плівкового провідника/ Д. Дячок, Л. Смеркло // Вісник Нац. університету "Львівська політехніка". Сер. Радіоелектроніка та телекомунікації.-2004.-№ 508.- С.281-285.
5. Смеркло Л. М. Комбінований спосіб виготовлення товстоплівкових НВЧ плат / Л. М. Смеркло, Д. Т. Дячок, Г. Л. Кучмій // Вісник Нац. університету "Львівська політехніка". Сер. Елементи теорії та прилади твердотільної електроніки.-2005.-№ 542.- С.52-55.
6. Дячок Д. Т. Взаємозв'язок конструктивних параметрів і електричного опору мікроконтактного з'єднання в ІС / Д. Т. Дячок, Л. М. Смеркло, В. В. Невзоров // Вісник Нац. університету "Львівська політехніка". Сер. Елементи теорії та прилади твердотільної електроніки.-2006.-№ 569- С.12-16.
7. Юрченко Л. Д. Модель перехідної ділянки між внутрішнім і зовнішнім виводом ІС та її характеристики / Л. Д. Юрченко, Д. Т. Дячок, В. А. Павлиш // Вісник Нац. університету "Львівська політехніка". Сер. Електроенергетичні та електромеханічні системи.-2006.-№ 563.-С.173-180.

8. Готра З. Ю. Анализ влияния способа соединения столбиковых выводов интегральных схем на их сопротивление / З. Ю. Готра, Д. Т. Дячок // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.-2009.-№ 2.-С.30-33.

9. А.с.1250982 СССР, МКИ G01R27/00. Способ определения сопротивления контактного соединения проволоки и тонкой пленки / Д. Т. Дячок. (СССР), -№3794975; Заявл.25.09.84; Оpubл.15.08.86, Бюл.№30. -5 с.

10. А.с. 1492309 СССР, МКИ G01R27/00. Способ определения сопротивления контактного соединения проволоки и пленочного проводника / Д. Т. Дячок, В. А. Павлиш, Л. М. Смеркло, Я. М. Сенишин (СССР). -№4296087; Заявл.11.08.87; Оpubл.08.03.89, Бюл.№ 25. -6 с.

11. А.с. 1269931 СССР, МКИ B23K1/20. Способ пайки алюминия и его сплавов / Д. Т. Дячок, А. А. Коваль, О. М. Лозовый, Ю. А. Писаренко (СССР) - №.3840342; Заявл. 04.01.85; Оpubл.15.11.86, Бюл.№ 42. -3 с.

12. Дячок Д. Т. Расчет напряжений среза в жестких выводах компонентов гибридных интегральных схем / Д. Т. Дячок, М. Д. Матвийкив // Тезисы докладов Всесоюзной научн.-техн. конф. "Теория и практика конструирования и обеспечения надежности и качества электронной аппаратуры и приборов", г.Воронеж,1-3 февраля 1984 г.- М.: Радио и связь, 1984.- С.15.

13. Dyachok D. The Simulation of Welded Microcontact connection of lead and Films Conductors / D. Dyachok, L. Smerklo // Proceedings of the International Conference TCSET ' 2004, "Modern Problems of Radio Engeneering,Telecommunications and Computer Scince". Lviv-Slavsko, Ukraine.-2004.- Lviv: Publishing House of Lviv Politechnic, 2004.- P.76.

14. Smerklo L. The Effect of Structural Parameters on Elektrical Resistance of Microcontact Connection in Integrated Circuits / L. Smerklo, D. Dyachok, M. Hladun // Proceedings of the International Conference TCSET ' 2006, "Modern Problems of Radio Engeneering, Telecommunications and Computer Scince". Lviv-Slavsko, Ukraine.-2006.- Lviv: Publishing House of Lviv Politechnic, 2006.- P.619.

15. Pavlysh V. Definition of the Mechanical Stress Value in the IC Pin Leads / V. Pavlysh, D. Dyachok // Proceedings of the International Conference TCSET ' 2008, "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science". Lviv-Slavsko, Ukraine.-2008.- Lviv: Publishing House of Lviv Politechnic, 2008.- P.91.

16. Дячок Д. Оцінка електричного опору стовпчикowego виводу ІС на його моделі / Д. Дячок, Р. Майстришин // Тези доповідей 11-ї відкритої наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки НУ “Львівська політехніка” з проблем електроніки, 1-3 квітня 2008, Львів: Вид-во НУ “Львів.політехніка”, 2008.- С.24.

17. Готра З.Ю. Визначення величини електричного опору контактних площинок в ІС / З.Ю. Готра, Д.Т. Дячок, А.Й. Семенюк // Тези доповідей 12-ї відкритої наук.-техн.конференції професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки НУ “Львівська політехніка” з проблем електроніки, 7-9 квітня 2009, Львів: Вид-во НУ “Львів.політехніка”, 2009.- С.22.